

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВИЛЬНЮССКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА им. ГЕДЕМИНАСА  
БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (УКРАИНА)  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ г. ЛЕЙРИИ (ПОРТУГАЛИЯ)  
АРИЭЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ИЗРАИЛЬ)  
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)  
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

Электронный сборник статей  
международной научной конференции,  
посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета

(Новополоцк, 5-6 апреля 2018 г.)

Под редакцией  
канд. техн. наук, доцента А. А. Бакатовича;  
канд. техн. наук, доцента Л. М. Парфеновой

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2018

*Редакционная коллегия:*

А. А. Бакатович (председатель), Л. М. Парфенова (зам. председателя),  
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,  
Т. И. Королева, В. Е. Овсейчик

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ** [Электронный ресурс] : электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. А. А. Бакатовича, Л. М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Рассмотрены организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.*

Компьютерный дизайн К. В. Чулковой, В. А. Крупенина.

Технический редактор О. П. Михайлова.

Компьютерная верстка Т. А. Дарьяновой.

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель	<i>Бакатович Александр Александрович</i> , декан инженерно-строительного факультета, кандидат технических наук, доцент, Полоцкий государственный университет (Беларусь)
Заместитель председателя	<i>Парфенова Людмила Михайловна</i> , заведующая кафедрой строительного производства, кандидат технических наук, доцент, Полоцкий государственный университет (Беларусь)
Члены оргкомитета	<i>Лазовский Дмитрий Николаевич</i> , ректор Полоцкого государственного университета профессор, доктор технических наук (Беларусь)
	<i>Кижиниевич Ольга</i> профессор, доктор философии Института строительных материалов, Вильнюсский технический университет им. Гедеминаса (Литва)
	<i>Роговский Сергей Владимирович</i> , заведующий кафедрой садово-паркового хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Белоцерковский национальный аграрный университет (Украина)
	<i>Флориндо Гаспар</i> профессор, доктор философии Политехнический институт г. Лейрии (Португалия)
	<i>Рыбаков Юрий</i> , профессор, доктор философии Ариэльский университет (Израиль)
	<i>Лазовский Егор Дмитриевич</i> , заведующий кафедрой строительных конструкций, кандидат технических наук, доцент, Полоцкий государственный университет (Беларусь)
	<i>Овсейчик Владимир Евгеньевич</i> , заведующий кафедрой архитектуры, кандидат исторических наук, доцент, Полоцкий государственный университет (Беларусь)
	<i>Королева Татьяна Ивановка</i> , заведующая кафедрой теплогазоводоснабжения и вентиляции, кандидат технических наук, доцент, Полоцкий государственный университет (Беларусь)

Секция I  
АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО  
В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

УДК721.021.23

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСТОРИЧЕСКОМ ИНФОРМАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ  
ЗДАНИЙ (HBIM)

*Е.В. Борсук, О.Н. Милашевич*

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

e-mail: katherine.borsuk@yahoo.com; protezhe@mail.ru

*Рассматривается подробное описание процедуры удаленного сбора данных с использование лазерного сканирования и последующей обработки, необходимой для обеспечения возможности создания полных инженерных чертежей по результатам лазерного сканирования и съемки изображений. Выявлены преимущества данного метода перед тахеометрическим и фотограмметрическим способами.*

*Ключевые слова: HBIM, реконструкция, 3D-моделирование, лазерное сканирование, облако точек.*

GENERAL INFORMATION ABOUT HISTORICAL INFORMATIONAL MODELING  
OF BUILDINGS (HBIM)

*E. Borsuk, O. Milashevich*

Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus

e-mail: katherine.borsuk@yahoo.com; protezhe@mail.ru

*This article describes in detail the description of remote data collection procedure using laser scanning and subsequent processing to determine a possibility to produce complete engineering blueprints based on the laser scans and the imaging. Outlined are advantages of this method over tacheometric and photogrammetric approaches.*

*Keywords: HBIM, reconstruction, 3D-modelling, laser scanning, Point Cloud.*

Историческое информационное моделирование зданий (HBIM) представляет собой новую прототипную библиотеку параметрических объектов на основе исторических архитектурных данных и систему программ для сопоставления параметрических объектов с данными облака точек и изображениями [1].

Геометрическое моделирование полностью или частично утраченных памятников архитектуры нацелено на решение множества объемно-пространственных задач, связанных с их виртуальной реконструкцией. Методики, позволяющие осуществить архитектурный, археологический, исторический анализы на основе трехмерного моделирования, стали достаточно востребованными в настоящее время. Стремительными темпами развивается разработка и усовершенствование программного обеспечения, способствующего выполнению разнообразных запросов и иных актуальных работ в области реконструкции. Формирование трехмерной модели любой степени сложности в настоящее время не представляет особого труда, так как нынешние графические редакторы, используемых в трех-



мерном моделировании, в полной мере обладают необходимым набором инструментов, позволяющих, не только задать объекту любую форму, но и разнообразно текстурировать его поверхности, а также продемонстрировать уникальные возможности формообразования посредством различных способов и средств освещения.

В данном контексте особую актуальность приобретает деятельность по преобразованию историко-архитектурных памятников, разработке методов, позволяющих уменьшить период моделирования, усовершенствовать качество построения, визуализации и детализации. Сегодня подобные методы ориентируются, прежде всего, на использование интеллектуальной аналитической оценки исходных параметров объектов виртуальной реконструкции с применением электронных библиотек.

В современной практике возрождения утраченных памятников архитектуры используют различные методы, основанные на использовании:

- ручных измерительных средств (измерительные ленты, уровни);
- оптических приборов (нивелир, теодолит и уровень);
- методов фотограмметрии.

В настоящее время цифровые технологии автоматизировали процесс сбора и обработки данных. Эти технологии основаны на:

- использовании лазера;
- цифрового фотомоделирования;
- программных платформ.

Лазерное сканирование – это технология, позволяющая за минимум времени получить максимум информации. Лазерный дальномер существует уже давно. Его принцип основан на измерении времени прохождения узконаправленного луча лазера до объекта и обратно. Такой дальномер есть в каждом электронном тахеометре [2]. Суть технологии лазерного сканирования основана на определении пространственных координат точек объекта. То есть, прибор, при помощи фазового или импульсного безотражательного дальномера вычисляет расстояния до всех точек объекта и измеряет вертикальные и горизонтальные углы. При этом создается трехмерное изображение (с координатами XYZ) в виде облака точек. Принцип действия схож с работой электронного тахеометра, но только, процесс съемки совершается в разы быстрее.

К числу основных преимуществ данного метода перед тахеометрической съемкой и другими наземными видами съемки, можно отнести:

- мгновенную трехмерную визуализацию;
- высокую точность;
- несравнимо более полные результаты;
- быстрый сбор данных;
- обеспечение безопасности при съемке труднодоступных и небезопасных с эксплуатационной точки зрения объектов.

Преимущества метода перед фотограмметрическими способами съемки:

- получение координат с одной точки стояния и без последующей камеральной обработки,
- обеспечение более высокой точности измерений по сравнению с фотограмметрическими методами при одинаковом удалении от объекта;
- возможность настройки некоторых моделей сканеров на фиксацию первого и/или последнего отражения, что позволяет отделять отраженный сигнал от растительности и поверхности земли – «пробивать» растительность;
- упрощенная схема привязки к системе координат;
- снижение материальных затрат.

Управление наземным лазерным сканером производится посредством панели управления, встроенной в сканер, либо удаленно, используя WI-FI или кабель. Сам процесс съемки достаточно прост и имеет следующую последовательность:

- 1) определение зоны взаимного перекрытия сканов, установка мишеней;
- 2) установка лазерного сканера на штатив в определенных зонах;
- 3) задание прибору плотности облака точек и области съемки;
- 4) запуск процесса лазерного сканирования объектов.

После выполнения сканирования объекта, начинается этап камеральной обработки полученного облака точек. Камеральный этап выполнения изысканий является заключительным и проводится с целью подготовки итогового продукта, который изначально требовался в техническом задании, а также технического заключения и комплекта документации по объекту. На этом этапе происходит обработка данных полевых измерений, все полученные результаты оцениваются на предмет точности. На стадии обработки данных инженеры производят очистку полученных сканов от посторонних шумов и осуществляют их сшивку в единое облако точек всего объекта, что требует, как высокой квалификации операторов, так и значительных ресурсов задействованных компьютеров. После обработки облака точек производится его импорт в стандартные САПР-системы, такие как: Cyclone от LeicaGeosystem, AutoCAD, MicroStation, Rhinoceros [3] и другие, где создаются точные обмерные чертежи, планы, разрезы, сечения, либо выполняется 3D-моделирование (рис. 1).

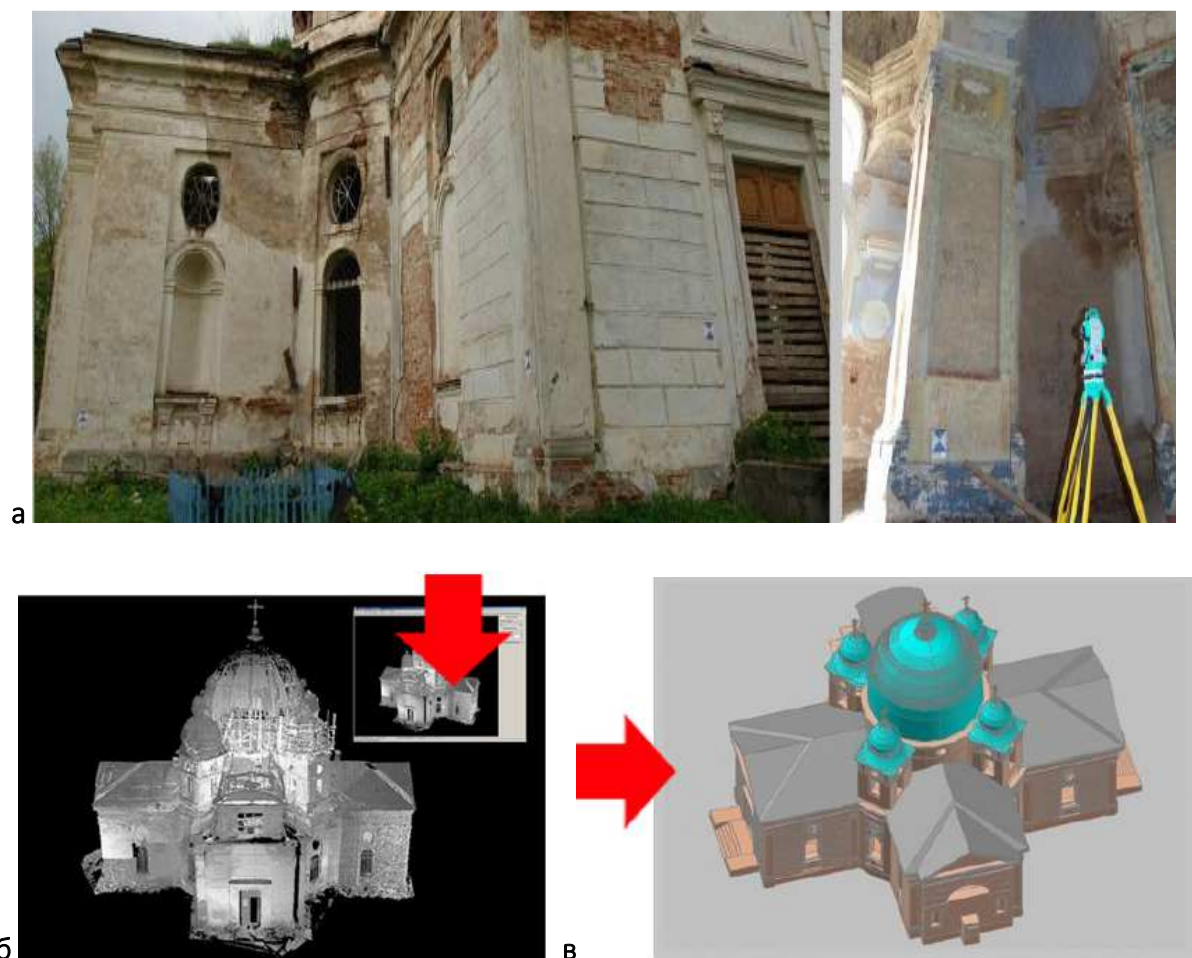


Рисунок 1. – Изображение процесса лазерного сканирования:

- а* – сканирование объекта с помощью лазерного сканера;  
*б* – обработка «облака точек»; *в* – редактирование модели [4]

Заключительный этап знаменуется передачей заказчику полного комплекта проектной документации, которая является неотъемлемой частью процесса реконструкции, реставрации и консервации памятников историко-культурного наследия. Качество предоставляемой документации можно считать надлежащим, если:

- содержимое отражает все подробности о памятнике и его окружении, а также обо всех процессах вмешательства в историческую структуру;
- обеспечены доступность, сохранность и удобство пользования для исследователей и профессионалов, как в настоящее время, так и в обозримом будущем [5].

Наземная лазерная съемка на объектах историко-культурного наследия имеет особое, очень важное значение. Обмерные чертежи, полученные после наземного лазерного сканирования, дадут возможность решать различные задачи при регенерации реконструкции и реставрации объектов исторического наследия.

Таким образом, можно с большой долей уверенности предположить, что будущие исследования будут сосредоточены на следующих трех основных направлениях:

- усовершенствование методологии использования геометрического описательного языка для создания сложных параметрических объектов;
- разработка обширной библиотеки применительно к объектам историко-культурного наследия;
- определение промежуточных программных платформ для ускорения наземного лазерного сканирования в рамках HBIM.

Научный руководитель – **А. С. Давидович**, кандидат архитектуры, доцент кафедры строительных конструкций, Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Республика Беларусь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Murphy, M. Historic building information modelling (HBIM) / M. Murphy, E. McGovern, S. Pavia // Structural Survey. – Vol. 27, Iss. 4. – P. 311–327.
2. Бавбель, Е.И. Новые возможности применения наземного лазерного сканирования при изысканиях объектов строительства / Е.И. Бавбель, Т.С. Селезнева // Труды БГТУ. – Минск, 2013 – № 2 (158). – С. 49–50.
3. Гура, Т.А. Обработка данных наземного лазерного сканирования для получения обмерных чертежей объектов культурного наследия [Электронный ресурс] / Т.А. Гура, А.Е. Катрич // Молодой ученый. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/130/35894/>. – Дата доступа: 19.03.2018.
4. ScanIMAGER – миллиарды точек в одном окне [Электронный ресурс]. – ScanIMAGERProfessional. – Режим доступа: <http://www.scanimager.ru/examples.html>. – Дата доступа: 13.03.2018.
5. Рой, Д.Н. Опыт применения метода наземного лазерного сканирования для работ в области историко-культурного наследия / Д.Н. Рой // Геопрофи. – М. : Проспект, 2007. – С. 23.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРИМЕРЕ СОБОРА В ДАРЕМЕ

Е.В. Борсук, О.Н. Милашевич

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

e-mail: katherine.borsuk@yahoo.com; protezhe@mail.ru

*Реконструкция объектов наследия - это большая ниша в строительной отрасли. Она традиционно включает в себя процессы обследования текущего состояния зданий, создание 2D- и 3D-моделей, планирование внутреннего пространства и прочее. Это очень медленный и дорогостоящий процесс и требует значительного пересмотра подхода к реконструкции и внедрения инноваций. Данная статья направлена на изучение реновационных процессов с помощью внедрения и адаптации BIM-технологий. В качестве примера был выбран знаменитый собор в Дареме.*

*Ключевые слова: BIM, реконструкция, 3D-моделирование, лазерное сканирование, облако точек, культурное наследие.*

## RECONSTRUCTION OF HISTORICAL LANDMARKS USING BIM-TECHNOLOGY IN AN EXAMPLE OF ST. CUTHBERT'S CHURCH IN DURHAM, UK

E. Borsuk, O. Milashevich

Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus

e-mail: katherine.borsuk@yahoo.com; protezhe@mail.ru

*Reconstruction of heritage objects is a big niche in construction industry. It traditionally includes surveys of current building conditions, creating 2D- and 3D- models, inner space planning and others. This very slow and costly process requires significant revision of reconstruction process and integration of innovations. This article is aimed at renovation processes research with aid of integration and adaptation of BIM-technologies. As an example St. Cuthbert's church in Durham was chosen.*

*Keywords: BIM, reconstruction, 3D-modelling, laser scanning, Point Cloud, cultural heritage.*

Собор Дарема был основан в 1099 г. и остается центром христианского вероисповедания. Памятник архитектуры расценивается как один из самых прекрасных романских соборов в Европе и является объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО.

При строительстве собора использовались новые архитектурные идеи и самая передовая по тому времени строительная техника, которые практически готовы были превратиться в стандарты. Постройка выполнена в самом большом масштабе, который позволял участок (рис. 1). Восточный рукав был четырехпролетным с апсидами по бокам, над которыми, вероятно, располагались башенки, четырехпролетный трансепт с проходами в восточной стене каждого рукава и восьмипролетный неф с парой башен над самой западной травеей. Пространство всех рукавов занимали чередующиеся столбы и колонны, среднего размера галерея и верхний ряд окон со стенным проходом, проходившим в трансепте и нефе. Колонны в восточном рукаве и в трансепте были оформлены спиралями и другими узорами – в нефе. Своды второго этапа вместе с первым сохранились в трансепте и нефе.

Восточный рукав состоит из четырех пролетов, первоначально оканчивавшихся в приподнятой апсиде, к которой примыкали боковые нефы с апсидами [1].



Рисунок 1. – Внешний облик собора в Дареме в настоящее время

В 2015 году остро встал вопрос о необходимости реконструкции. Было выбрано исследование с использованием BIM технологий для достижения эффективности путем перехода от традиционных процедур к современным.

Первоначально было предложено создать BIM-модель для всего Даремского собора, но это оказалось неосуществимым в тот момент времени. Помещение собора было выбрано в качестве пилотного проекта, демонстрирующего процесс BIM и его потенциальную пользу и выгоду. В случае успеха, этот процесс мог бы быть перенесен на остальную часть собора.

Технология Информационного Моделирования Зданий (Building Information Modeling – BIM) – это не просто трехмерное отображение проектируемого объекта в том или ином графическом стиле с определенной степенью условности (эскизы, чертежи, перспективные виды, визуализация с материалами и тенями). BIM – это компьютерное проектирование, когда создается виртуальная модель здания со всеми заложенными в него техническими и функциональными параметрами [2].

Информационная модель весьма полезна для уже существующих объектов, поскольку содержит всю информацию о них.

В наиболее развитых мировых центрах на сегодняшний день уже построено так много, что на первое место там выходит не создание новых, а реконструкция и реставрация имеющихся зданий и сооружений.

Преимущества BIM перед традиционным проектированием:

- возможность моделировать изменения в конструкции здания,
- проектировать переоснащение здания новым инженерным оборудованием, доводя его эксплуатационные характеристики до современного уровня требований,
- отслеживать текущее состояние здания (особенно важно для памятников архитектуры) и своевременно принимать меры по реставрации,
- грамотно эксплуатировать существующие объекты [3].



Реставрация и реконструкция историко-культурных памятников – это область, которую пока в наименьшей мере коснулись современные компьютерные технологии, достаточно редко применяются непосредственно в реставрационно-проектной деятельности.

Первым шагом, предпринятым для построения информационной модели, было проведение большой аналитической работы, такой как: сбор библиографических и архивных исследований, осуществление архитектурных обмеров габаритов здания и деталей фасадов.

Команда, занимавшаяся реконструкцией собора в Дареме, предложила лазерное сканирование и создание 3D-модели комнаты.

Технология лазерного сканирования основана на измерении расстояния от лазерного дальномера до поверхности сканируемого объекта и двух углов (горизонтального и вертикального), определяющих направление вектора от лазерного дальномера до объекта в местной системе координат [4].

Модель, полученная после наземного лазерного сканирования, состоит из тысячи линий, точек и полигонов, и, соответственно, имеет большой вес, поэтому облако точек было разбито на секции. Работа велась на отдельных участках и в финале была сформирована в единую модель.

Использование оборудования для лазерного сканирования и преобразование облака точек в BIM-модель являются дорогостоящими и требуют определённого навыка работы.

Результаты сканирования импортировались в AutodeskReCap, где они были очищены от частей здания, которые не подвергались реконструкции, модель ReCap была затем связана с AutodeskRevit.

Обследованное здание имеет неправильные формы, а стандартные современные инструменты не могут использоваться для точного представления его наклонных структур. Поэтому для этих областей использовался инструмент «Общая модель», который позволял создавать на заказ компоненты как можно более реалистичным, а затем вручную добавлять к нему любые объектно-ориентированные параметры.

После создания геометрии модель была заполнена параметрическими данными, в результате была получена «интеллектуальная» модель, которая включала в себя информацию о текущем состоянии конструкций, а также фасады, разрезы и планы этажей (рис. 2).



Рисунок 2. – 3D-модель, созданная на основе облака точек

После того, как модель была завершена, она была продемонстрирована заказчику.

Обсуждения вокруг BIM модели, рабочего процесса и функций BIM определило следующие преимущества:

- предоставление точной информации о текущем состоянии и планировке здания как единого целого;
- снижение необходимости проведения дорогостоящих, трудоемких и потенциально интрузивных мер, а также уменьшения человеческой ошибки, связанной с таким процессом;
- добавление индивидуальных параметров, включая состояние элементов, связанных с заданным цветом для каждого значения параметра, обозначающего степень тяжести, условия и срочность ремонтных работ, например, «A:severecondition», «C:minorcondition», «1:urgent» и «3: lowpriority»;
- создание графиков технического обслуживания;
- облегчение планирования и моделирования внутреннего пространства (рис. 3);
- обеспечение удаленного и удобного доступа к информации и моделям при поддержке мобильного устройства [5].

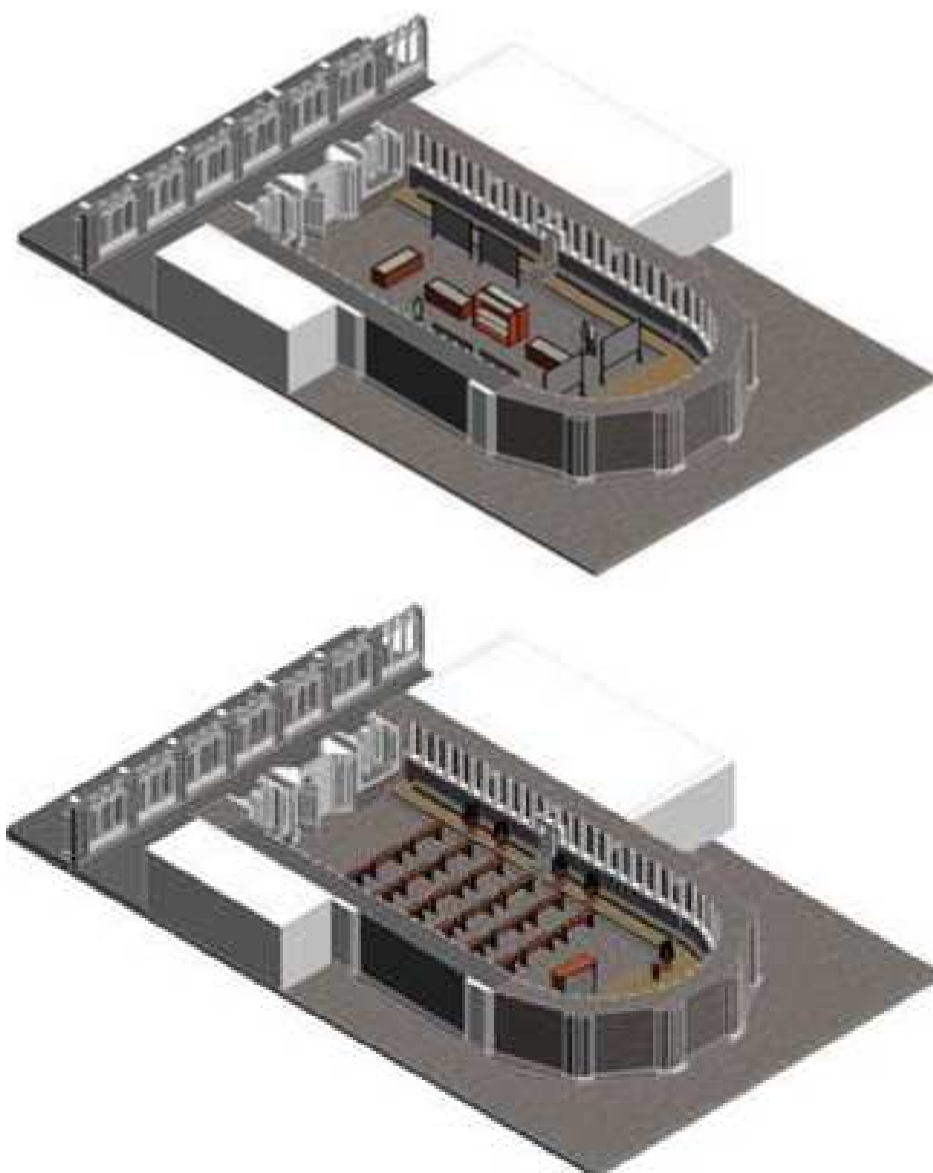


Рисунок 3. – Моделирование внутреннего пространства комнаты

Благодаря технологии BIM реконструкционное и реставрационное проектирование выходит на новый уровень.

Можно сделать вывод, что готовая модель может обеспечить исторические объекты основой нового цифрового инструментария для более эффективного управления зданием, а также для сохранения и грамотного обслуживания будущими поколениями.

Научный руководитель – **А. С. Давидович**, кандидат архитектуры, доцент кафедры строительных конструкций, Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Республика Беларусь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бабошина, О.Н. Даремский собор как уникальный памятник нормандской архитектуры на территории Англии / О.Н. Бабошина // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. – 2012. – № 9 (23) : в 2 ч. – С. 31.

2. Козлова, Т.И. Опыт информационного моделирования памятников архитектуры [Электронный ресурс] / Т.И. Козлова, В.В. Талапов // Международный электронный научно-образовательный журнал «AMIT» /. – Режим доступа: <http://www.marhi.ru/AMIT/2009/3kvart09/Talapov/Article.php> – Дата доступа: 20.03.2018.

3. Талапов, В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 392 с.

4. Вальдовский, А.В. Высокоточная съемка промышленных объектов методом лазерного сканирования с последующим 3D-моделированием [Электронный ресурс] / А.В. Вальдовский, Г.Ю. Морозова // САПР и графика. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/21468> – Дата доступа: 23.03.2018.

5. Renovation of Heritage Assets using BIM: a Case Study of the Durham Cathedral / O. Tapponi [et al.] // Conference 2015, 27th-29th 2015. – Eindhoven, The Netherlands, 2015. – P. 706-715.



## К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В БЕЛАРУСИ

А.В. Евстратенко

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

e-mail: krisis@inbox.ru

*Рассматриваются вопросы размещения объектов придорожного сервиса в Беларуси. Предложены методы их интегрирования в имеющийся ландшафт при автомобильных дорогах, выявлены соответствующие особенности рассматриваемых объектов.*

*Ключевые слова: объект придорожного сервиса, обслуживание, размещение, архитектурно-планировочная структура, инфраструктура, визуальный образ.*

## CONCERNING THE FORMATION OF THE ROAD INFRASTRUCTURE IN BELARUS

A. Evstratenko

Belarusian State University of Transport, Gomel

e-mail: krisis@inbox.ru

*The issues of accommodation of roadside service objects in Belarus are considered. The methods of integration into the existing landscape are proposed at highways, the corresponding features of the considered objects are revealed.*

*Keywords: object of roadside service, service, accommodation, architectural and planning structure, infrastructure, visual image.*

Республика Беларусь имеет развитую сеть автомобильных дорог, часть которых входит в состав международных автотранспортных коридоров под номерами II (Запад – Восток) и IX (Север – Юг) с ответвлением IXB. В прошлом году транспортные услуги сформировали 45 % общего объема экспорта услуг страны. Это свыше 3,4 млрд долл. США с темпом роста 118,6 %. В числе лидеров по росту объемов экспорта услуг – автомобильный транспорт (123,3 %), в том числе благодаря государственно-частному партнерству с ассоциацией «БАМАП». На автомобильном транспорте в текущем году лежит большая ответственность за качественную подготовку транспортного обеспечения Республики Беларусь к проведению Европейских Игр 2019 года [1]. Такие факторы, как выгодное геополитическое положение, рост автомобилизации и мобильности населения, а также повышение требований к качеству дорог и их обустройства стимулируют развитие придорожной инфраструктуры Беларуси. В 2017 году в целях создания условий по повышению эффективности использования транспортной инфраструктуры и транзитной привлекательности нашего государства подписано Соглашение между Правительством Республики Беларусь и Правительством Китайской Народной Республики о развитии международных грузовых перевозок и сотрудничестве в реализации концепции строительства Экономического пояса Шелкового пути [1]. Инфраструктура белорусских дорог представлена автозаправочными и газозаправочными станциями, предприятиями торговли, объектами общественного питания и постоя, автомобильными мойками, станциями технического обслуживания и охраняемыми стоянками.

С целью исследования и глубокого анализа условий формирования сети придорожного сервиса в Беларуси автором осуществлено изучение нормативно-правовой документации, литературных источников по указанной теме, обследование ряда автодорог республиканского значения, а также проведены опросы и анкетирование участников дорожного

движения. Полученные результаты позволили определить характеристические особенности сети в Беларуси, условия формирования и функционирования объектов, современные требования к ним пользователей. Потребителями услуг объектов придорожного обслуживания являются местные жители и иностранные граждане, совершающие поездки в частных, туристических, транзитных целях, для осуществления трудовой деятельности. Как отдельные потребители, так и компании, производящие мониторинг пунктов придорожного обслуживания, отмечают недостаточные количественные и качественные характеристики объектов придорожного сервиса на территории нашего государства. Республика Беларусь, принимая участие в интеграционных процессах (в частности в Евразийское транспортное пространство), межгосударственных соглашениях, программах и иных инициативах, заинтересована в создании на своей территории конкурентоспособного продукта и сервиса. Отсутствие регламентации размещения и архитектурно-пространственного решения объектов придорожного обслуживания на ранних этапах привело к неравномерному распределению (скоплению заведений на малых и полному отсутствию на других протяженных участках) вдоль автодорог и несогласованности в облике и структуре построек.

Современные условия диктуют несколько иные требования и подходы к формированию каждого объекта и сети в целом. Участок размещения здания придорожного сервиса не должен быть избран спонтанно, а требует определенной аргументации. Основанием для устройства объектов придорожного сервиса могут служить следующие принципы размещения и включения их в имеющийся ландшафт: средовая интеграция, инфраструктурное развитие, элементное внедрение, локальное размещение, туристическое соседствование, независимое присоединение, городское соседствование. Базисом указанных принципов являются в первую очередь социальные потребности и стандарты, экономическая целесообразность.

Метод средовой интеграции основан на определяющей роли ландшафтно-рекреационного критерия, заключающегося в близости водных артерий, лесных массивов, наличии весьма привлекательного ландшафта. Особенности природной среды сохраняются и эффективно используются, немало влияя, а зачастую определяя планировочную структуру. Естественный природный комплекс, отличающийся выразительностью, предполагает лаконичное включение здания в ландшафт, обеспечивающее необходимые условия для рекреации. Такие заведения не только мотивируют участников дорожного движения к совершению остановки и использованию предоставляемых услуг, но и становятся объектами целенаправленного посещения как местными жителями, так и иностранными гражданами. Данным объектам свойственна расширенная структура, обусловленная предоставлением услуг основного (пункты постоя и питания) и второстепенного характера (баня, пункт проката, медпункт) как участникам дорожного движения, так и посетителям, выбравшим заведение для активного и пассивного отдыха. Целесообразно устройство террас, беседок, открытых площадок. Для объектов, устроенных по методу средовой интеграции, характерна неравномерная посещаемость в течение года.

Интегрирование по методу инфраструктурного развития заключается в формировании и расширении сервиса в пределах участков дорог, где испытывается дефицит в предприятиях обслуживания. Предпосылками выступают физиологический и технический, а также критерий безопасности. Номенклатура услуг и соответствующий состав таких объектов определяется нуждами водителей и пассажиров, необходимостью поддержания работоспособного состояния транспортного средства. Прежде всего отмечается потребность в услугах автозаправочных станций, пунктов питания и станций технического обслуживания. На межселенных территориях, где наиболее вероятна сложность подведения коммуникаций и неудовлетворительный экономический эффект, рационально возводить объекты конкретного назначения в соответствии с нуждами участников дорожного движения.

Организации придорожного обслуживания, представляющие составной частью сосредоточения на малом участке трассы нескольких объектов различного назначения, формируются по принципу элементного внедрения. Вблизи имеющихся организаций возводится недостающий объект обслуживания. Данный метод, использовавшийся на территории Беларуси на протяжении долгого времени, имеет очевидные недостатки: ухудшение безопасности трассы и удобства перемещения, а также несогласованность в облике соседствующих зданий и территориального обустройства. С учетом современных требований и условий, в которых формируется придорожная инфраструктура Беларуси, метод элементного внедрения должен реализовываться путем предусмотрения еще на стадии проектирования возможности дальнейшего расширения предприятия. Кроме того, необходимо объединение подъездных путей и примыкающих территорий соседствующих объектов с организованным движением по ним, общими въездами и выездами.

Локальное размещение – постановка объекта у пересечений автомобильных дорог, в частности, республиканских трасс с автодорогами местного значения. В данном случае число потенциальных клиентов выше за счет суммирования потоков автотранспорта с двух автодорог. Если постановка предприятия обслуживания у пересечения дорог в разных уровнях неудобна и соответственно запрещена, то при пересечении в одном уровне потенциал участка зачастую достаточно высок для размещения многофункционального объекта придорожного сервиса. Пункты общественного питания, постоя и технического сервиса наиболее востребованы. Однако указанный метод требует эффективных решений, касающихся организации прилегающей территории и обеспечения безопасного перемещения по соответствующим участкам автодорог. Обследования республиканских автотрасс Беларуси показало, что многие площадки у пересечений автодорог заняты объектами, представляющими весьма ограниченный перечень услуг и не имеющими ни качественного архитектурно-планировочного решения, ни благоустройства как такового.

Принимая во внимание проводимую в Беларуси политику по развитию отрасли гостеприимства и популяризации местного туристического продукта, актуальным становится принцип туристического соседствования. Фокусы притяжения туристов в нашей стране расположены разрозненно, потому автомобильному транспорту отведена главная роль в обеспечении туристических перемещений. Объекты придорожного сервиса принимают на себя функции обслуживания туристов как следующих транзитно, так и посещающих близлежащие достопримечательности. И в данном случае имеет место сезонный характер пребывания. Структура такого объекта должна быть представлена пунктами питания, постоя, медицинской помощи, обмена валют, обязательны киоски продажи сувенирной и печатной продукции. В соответствии с очевидной необходимостью устраиваются автомобильные мойки и станции технического обслуживания. Важно предоставление услуг связи, информирования, электронного бронирования. Некоторыми подобными заведениями, в особенности за рубежом, предоставляется сервис проката транспортных средств и экскурсионного обслуживания.

Наиболее используемым в Беларуси является метод независимого присоединения, заключающийся в размещении объекта придорожного сервиса в пределах населенного пункта. Распространенность метода объясняется удобством подведения коммуникаций и большим числом потребителей, обеспечивающимся как участниками дорожного движения, так и жителями населенного пункта. Такие объекты имеют немалую значимость в качестве сельской инфраструктуры, улучшая условия труда и быта жителей сельских населенных мест. Кроме привычных услуг автозаправочных станций, объектов питания и технического сервиса, актуальным становится оказание бытовых и иных дополнительных услуг (химчисток и прачечных, парикмахерских, ремонта обуви и одежды, автомобильных моек), а также устройство банкетных и танцевальных залов. Таким образом обеспечивается обслуживание сразу двух целевых групп: участников дорожного движения и местного населения.

Метод городского соседствования предполагает формирование объекта придорожного обслуживания вблизи крупных городов, областных и районных центров. На данных участках автодорог наиболее интенсивное движение. Кроме того, при высоком качестве архитектурно-пространственного решения и обслуживания объекты приобретают популярность у жителей городов, к которым примыкают. Этими причинами во многом объясняется высокая концентрация предприятий придорожного сервиса в радиусе 25 км от областных центров и 10 км от крупных районных центров. В зависимости от категории пользователей владельцами данных предприятий предусматриваются группы помещений развлекательного характера (бильярдные, боулинги, зоны для занятий теннисом, сауны и т. д.). В некоторых случаях данный метод полностью соответствует вышеупомянутым способам независимого присоединения и элементного внедрения.

Указанные методы включения объекта придорожного сервиса определяют его структуру, особенности функционирования и соответственно архитектурно-пространственное решение. Несмотря на очевидное многообразие, заведения придорожного сервиса должны обладать свойством узнаваемости.

Автомобильная дорога с сопровождающим ее ландшафтом и обустройством является средой, в которой путешественник проводит немало времени, воспринимая в том числе специфичные для определенной местности или маршрута визуальные образы. При этом в сознании формируется представление о регионе и соответствующие ассоциации. Благодаря средствам архитектуры автомобильная дорога предстает как градостроительный объект с характерным формообразованием и архитектурно-художественным оформлением.

Объекты обслуживания в придорожной полосе различно ориентированы по отношению к автодороге: возможно фронтальное, торцевое, многостороннее, глубинное, распределенное расположение. При ориентации протяженного по горизонтали главного фасада параллельно автодороге здание придорожного обслуживания образует фронтальную композицию – наиболее характерный тип построения. Редко встречающееся торцевое расположение отмечается в случае, когда к линии дорожного полотна обращен боковой фасад. Многостороннее расположение характерно для большого числа объектов, размещенных локально у пересечений дорог, когда в обоих направлениях открывается вид практически на все фасады и образуется цельный визуальный образ здания. Глубинное размещение характеризуется постановкой здания на некотором отдалении от дорожного полотна, но в пределах полосы отвода. Фасад строения может быть частично скрыт зелеными насаждениями и располагаться за активно благоустроенным участком территории. Объект придорожного сервиса, представленный несколькими достаточно равноценными различно ориентированными объемами, имеет распределенную компоновку.

Предложенные принципы и методы могут быть положены в основу дальнейших исследований и предложений по повышению качества сети придорожного сервиса в Беларуси. Совершенствование придорожного обустройства необходимо проводить, опираясь на запросы потребителей и социальные стандарты, используя все доступные оптимальные решения и приемы архитектурной выразительности каждого отдельного объекта и сети в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Минтранс РБ подвел итоги работы в 2017 году [Электронный ресурс]. – Министерство транспорта и коммуникаций. – Режим доступа: <http://www.mintrans.gov.by/ru/news-ru/view/mintrans-rb-podvel-itogi-raboty-v-2017-godu-2951-2018/>. – Дата доступа: 20.03.2018.

# АСПЕКТЫ ИСТОРИЧЕСКОГО И КУЛЬТУРНОГО РАЗВИТИЯ Н.П. ОСВЕЯ ВЕРХНЕДВИНСКОГО РАЙОНА ВИТЕБСКОЙ ОБЛАСТИ

Н.А. Железова

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: n.zhelezova@psu.by

*Рассматриваются историко-культурное прошлое н.п. Освея. Обращается внимание на настоящее и будущее его архитектурных памятников, его уникальное природное окружение.*

*Ключевые слова: историко-культурное развитие, памятники архитектуры, Освея.*

## ASPECTS OF THE HISTORICAL AND CULTURAL DEVELOPMENT OF OSVEY OF VERKHNEDEVINSKY DISTRICT OF VITEBSK REGION

N. Zhelezova

Polotsk State University, Belarus

email: n.zhelezova@psu.by

*The article deals with the historical and cultural past of St. Petersburg. Refreshing. Attention is drawn to the present and future of its architectural monuments, its unique natural surroundings.*

*Keywords: historical and cultural development, monuments of architecture, Osveya.*

**Введение.** Небольшой населенный пункт Освея – агрогородок в Верхнедвинском районе Витебской области, расположен на южном берегу Освейского озера.

Известно, что после отступления ледника в этих местах существовали древние поселения языческих племен. Археологи находят остатки древних городищ по всему периметру Освейского озера. Эти места в совокупности названы «Освейские городища». Находки датируются 7 в. до н. э. – 3 в. н. э. (рис. 1) [1].



Рисунок 1 – Орудия труда и украшения из городища Урагава (Верхнедвинский район)

Н.п. Освея впервые упомянута в XV веке. Считается, что название поселению дало озеро Освейское, площадью 52,8 км (рис. 2, 3), на берегу которого оно расположено. По

одной из версий название города означает «священный мыс» или «священное устье», так как место, откуда начиналась Освея — мыс, выдвинутый в озеро. В XVI веке Освея была центром волости Полоцкого воеводства. В 1695 году Освея получила права города. С 1772 года находилась в составе Российской империи. После Октябрьской революции перешла в состав БССР, а 1897 году Освею переименовали в центр волости Дриссенского уезда. В 1924—1959 годах Освея являлась центром Освейского района, и с 1938 года Освея называется уже не городом, а городским посёлком.

В настоящее время Освея является "северной жемчужиной" не только из-за своей привлекательности благодаря природным богатствам, но и благодаря уникальному архитектурному наследию. Здесь расположено Освейское озеро и один из самых крупных в республике водно-болотных комплексов, получивший почётный статус Рамсарского угодья благодаря своей неповторимой флоре и фауне. В центре озера находится остров площадью 4,85 км<sup>2</sup>, который имеет название Ду, что происходит от уральского термина «то», «ту» или «ты», что означало «озеро».



Рисунок 2. – Освейское озеро

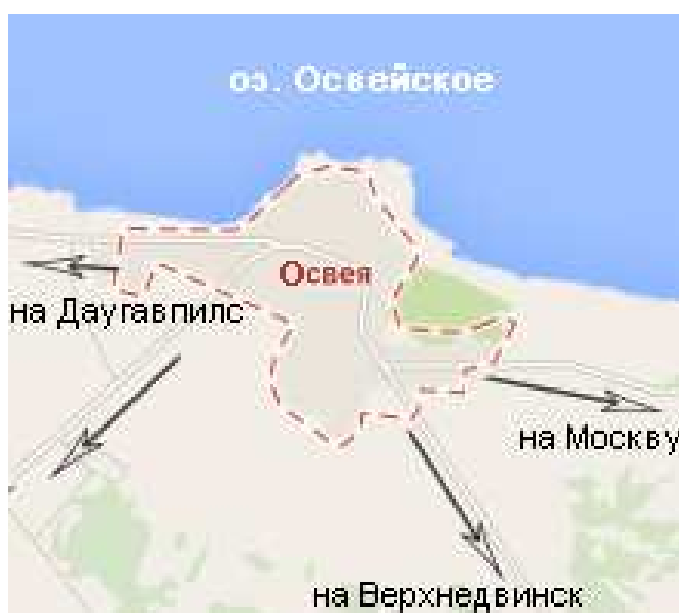


Рисунок 3. – Направления дорог, проходящие через г.п. Освея

**Основная часть.** В летописях н.п. Освея впервые упоминается в 1503 г. как волостной центр в составе Великого Княжества Литовского [2]. В течение XVI в. Освея принадлежала полоцкому воеводе С. Глебовичу, а позже Станиславу Кишке и Ивану Кишке. Но в 1585 г. Освея перешла в собственность иезуитов [2], которые основали здесь монастырь и первую в Освее школу. В 1600 г. Освея в числе прочих земель становится владениями канцлера ВКЛ Льва Сапегы. В этот период Освея неоднократно подвергалась разорительным набегам ратников из Себежа и Пскова.

Род Сапегов владел Освеей вплоть до 1749 г., когда местечко перешло к братьям Гильzenам – минскому воеводе Яну Гильзену и бискупу смоленскому Миколаю Гильзену. Гильзены происходили из старинного рыцарского рода де Энкелей из Вестфалии, во времена ВКЛ и Речи Посполитой занимали высокие государственные должности. Кроме того, прославились своей издательской литературной деятельностью и меценатством.

Неотъемлемой частью деятельности богатых людей и аристократов было меценатство. На эти деньги и возводились храмы, открывались госпитали и школы. Просветительская деятельность Гильзенов была необычайно активной и принесла много пользы северо-восточной Беларуси. Совместно с графами рода Плестер Я. Гильзен способствовал культовому каменному строительству в местечках и деревнях нынешней Витебской области. Были приглашены ведущие архитекторы Речи Посполитой того времени: Ян Главбиц, Людвиг Гринцэвич, Антоний Парако. А. Парако имел прямое отношение к Освее: по желанию владельца начались широкомасштабные градостроительные работы, в результате которых появились жилые кварталы с каменной застройкой. В центре местечка был организован просторный гостиный двор. Его появление было обусловлено тем, что через Освею в те времена проходил оживленный торговый путь из России в Литву и Польшу [5]. Кроме того, два раза в год (в мае и июне) в местечке проходила торговля (кирмаши). В конце XVIII в. в Освейском имении насчитывалось восемь тысяч жителей.

Когда-то в Освее находился один из красивейших дворцово-парковых ансамблей во всей Речи Посполитой. Он был внесен во Всемирное наследие ЮНЕСКО. К сожалению, к настоящему времени сохранились только руины и рисунки этого замечательного дворца, но и они завораживают, и наше воображение дорисовывает недостающие элементы дворца, выступающего из романтического парка.

Это Я. Гильзен построил в Освее резиденцию – дворцово-парковый комплекс площадью в 30 га. [3], который был наиболее значимым архитектурным объектом в Освее. Как правило, при строительстве барочной дворцовой резиденции одновременно закладывалась и культовая постройка местечка [4]. Так и в Освее дворцово-парковый ансамбль предварял барочный Троицкий костел, возведенный в 1782 г. (рис. 4). Благодаря семейству Гильзенов местечко стало известным центром просвещения на территории Беларуси. Можно говорить об этом периоде, как о времени расцвета Освеи.

В результате I раздела Речи Посполитой (1772 г.) Освея уже находилась в составе Российской Империи. Поэтому после смерти епископа Гильзена, а также его родственников, в 1786 г. Освейское имение переходит к графам Шадурским.

Согласно завещанию Гильзенов новые хозяева (семья Шадурских) должны были ежегодно вносить крупную сумму на содержание учащихся училищ при Освейском, а также Забельском монастырях. Таким образом, в Освее был создан крупнейший в Беларуси фонд, из которого продолжительное время выделялись средства на развитие образования. Но меценатская деятельность перестала одобряться высшим государственным управлением, поскольку, во-первых, в Российской империи не поддерживалась католическая конфессия, и, во-вторых, объем средств, направляемых графом Шадурским в собственные учебные заведения, не мог быть проконтролирован правительством. Исследователь Самусик А.Ф. [5] считает, что при ином развитии исторических событий, не будь фонд Гильзенов –

Шадурских ликвидирован, и по сей день происходило бы выделение денежных премий для развития образования, науки и культуры.

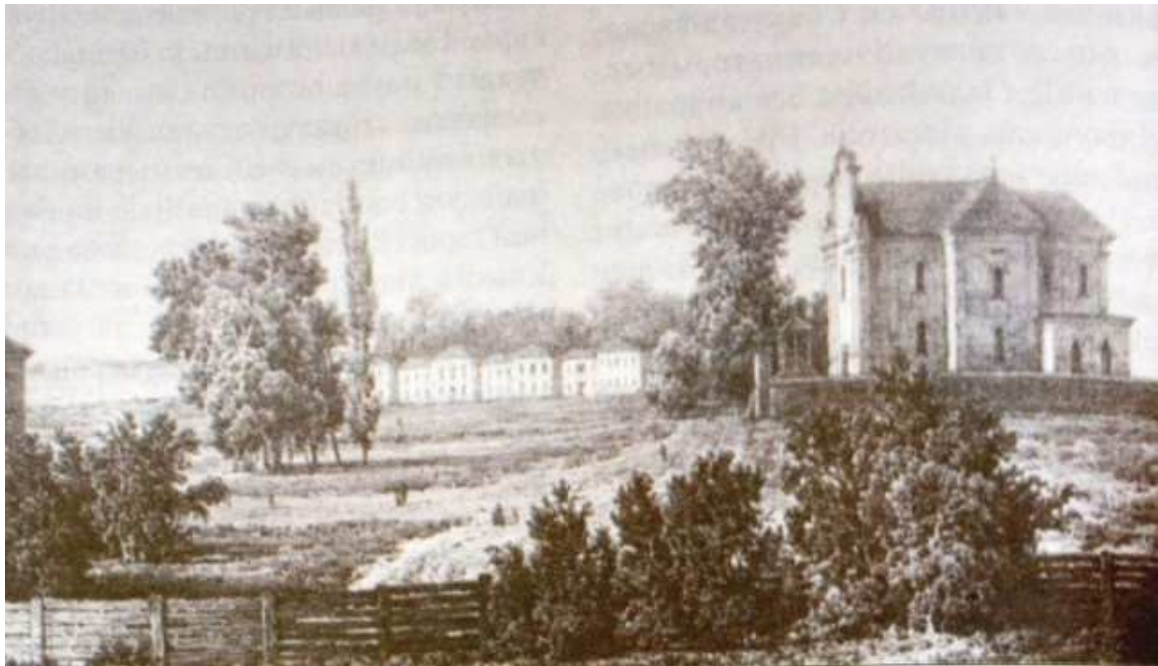


Рисунок 4. – Дворец и костел в Освее. Рисунок Н. Орды 1875-76 гг.

Дворец в Освее (позднее – дворец Шадурских) был построен в стиле классицизма (рис. 5). Он удивлял одновременно монументальностью и легкостью форм.



Рисунок 5. – Дворец Шадурских. Худ. Наполеон Орда, 1875-1876 гг.



По утверждению сторожилов и судя по зарисовкам художника Наполеона Орды, дворец имел вид птицы с распростертыми крыльями. Главных входных ворот было 4 по числу времен года, внутренних входов – 12 по числу месяцев в году, окон – 365 по числу дней в году. В одном из крыльев дворца размещался зимний сад. В нем, по утверждениям историков, находилась огромная библиотека. Возвели дворец на небольшой насыпной горе, в которой по всей площади застройки были спрятаны подвалы. Эту особенность диктовала высота грунтовых вод.

Двухэтажный дворец в пять корпусов и с четырьмя широкими галереями имел сложную внутреннюю раскладку. Необычная, по нынешним представлениям, была толщина его стен (около 700 мм). Основными украшениями помещений являлись пилястры и ниши. В центральном зале, который назывался «голубой», украшенном круглыми колоннами, с двух противоположных сторон были расположены по три высоких окна арочного типа.

До наших дней, к сожалению, дворец не дошел в своем первоизданном виде, можно увидеть только его руины (рис. 6–8).



Рисунок 6. – Руины дворца Шадурских 1



Рисунок 7. – Руины дворца Шадурских 2



Рисунок 8. – Руины дворца Шадурских 3

Особое место и гордость Освеи составлял Освейский парк. Он являлся одним из лучших образцов садово-паркового искусства эпохи романтизма. На данный момент сохранилось только его часть с редкими природными экземплярами, которые внесены в Красную книгу Республики Беларусь.

Это был пейзажный парк. Здесь все имело смысл и значение — любое дерево, возвышение, поляна. Главным достоинством его являлись ручьи. Они придавали этому искусственно созданному ландшафту естественность.

На площади более 30 га велись работы по формированию парка, но он сохранился частично на площади около 16 га. Парк занимает ровную, слегка пониженную территорию на южном берегу оз. Освея. В плане имеет форму прямоугольника без четко выраженной планировочной оси (рис. 9). В основу его композиции была положена сложная водная система, которая питалась водой озера через центральный канал. Пруды, каналы, протоки кольцом охватывали территорию парка, создавая иллюзию островного положения его центральной части. Пруды имели узкую прямоугольную форму, подобно водоемам уходящего регулярного периода в парковом искусстве. Положением дворца в глубине парка достигалось совершенство и разнообразие перспектив на водное зеркало водоемов, расположенных с двух сторон фасадов дворца и на озеро Освея. Въездная длинная аллея шла с западной стороны. Передний план парка составляли два пруда, вытянутых вдоль поперечной оси, с подъемным мостом через соединяющий их канал. От въезда открывалась панорама большого парадного подъезда перед величественным зданием дворца.

Свое благополучное и ухоженное существование старый парк прекратил после изгнания из Освеи последнего его хозяина. И с тех пор ни разу не восстанавливался.

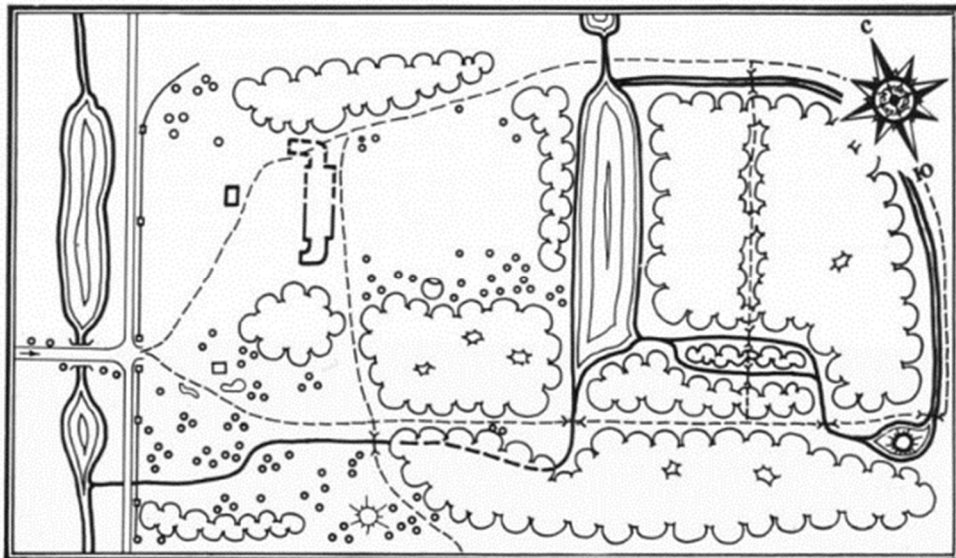


Рисунок 9. – Схема Освейского парка

Возле дворца Шадурских в парке располагался Троицкий костел, построенный в 1783 г. (рис. 10). Известно, что костел был оштукатурен, и ограда вокруг него из сплошного кирпича была крыта черепицей.

Костел и Освейский дворец (или дворец Шадурских) были сооружены из кирпича одинакового размера. Фасад католического собора был гораздо уже центрального нефа и декорирован ордерами пилястрами. Во внутреннем пространстве Троицкого костела располагался купол, расписанный местными художниками.

К сожалению, до наших дней сохранился только фундамент, склеп этого костела, некоторые описания из воспоминаний современников о фасадах и интерьерах величественного когда-то костела и рисунки художника Наполеона Орды.



Рисунок 10. – Троицкий костел. Худ. Наполеон Орда, 1875-1876





Рисунок 10. – Троицкий костел. Аркада

Ранее в н.п. Освея было три храма: костел и две православные церкви, но ни один храм до наших дней не сохранился.

Небольшая деревянная православная церковь когда-то стояла в Верхнедвинске на кладбище. Когда завершился период богоборчества, эту церковь перевезли в Освею и поставили рядом с горой, на которой раньше стоял православный храм. Эту церковь, как победу над воинствующим атеизмом, освятили в честь Георгия Победоносца (рис. 11). В настоящее время в ней проходят православные службы.

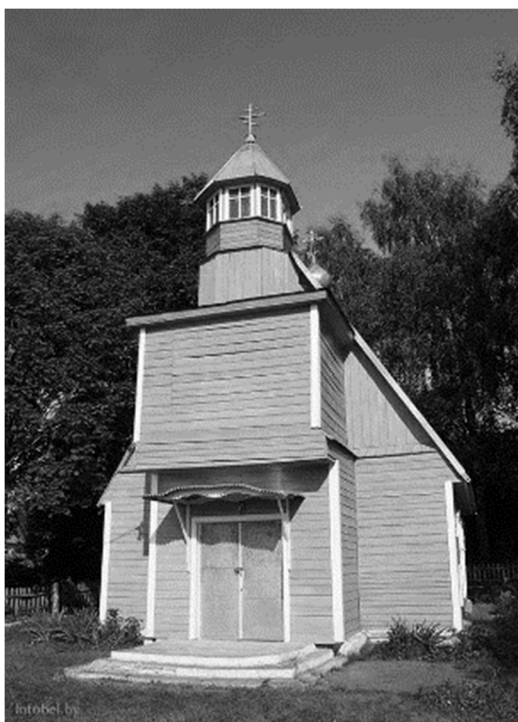


Рисунок 11. – Церковь св. Георгия Победоносца

Сохранившееся здание монастырского госпиталя - памятник архитектуры середины XVIII века с элементами барокко (рис. 12). Основан сестрами милосердия, которых пригласил в Освею ее владелец, минский воевода Ян Август Гильзен.

Монастырский госпиталь располагался на восточной периферии поселка возле парка. В настоящее время в здании бывшего госпиталя находится городская больница. За долгие годы здание не изменило своего функционального назначения.

Здание П-образное в плане, одноэтажное с полуподвалами в боковых частях (рис. 13). В средней части комнаты размещены с двух сторон от коридора, в боковых частях – с одной. Все стены одинаковой толщины (710 мм.)



Рисунок 12. – Монастырский госпиталь

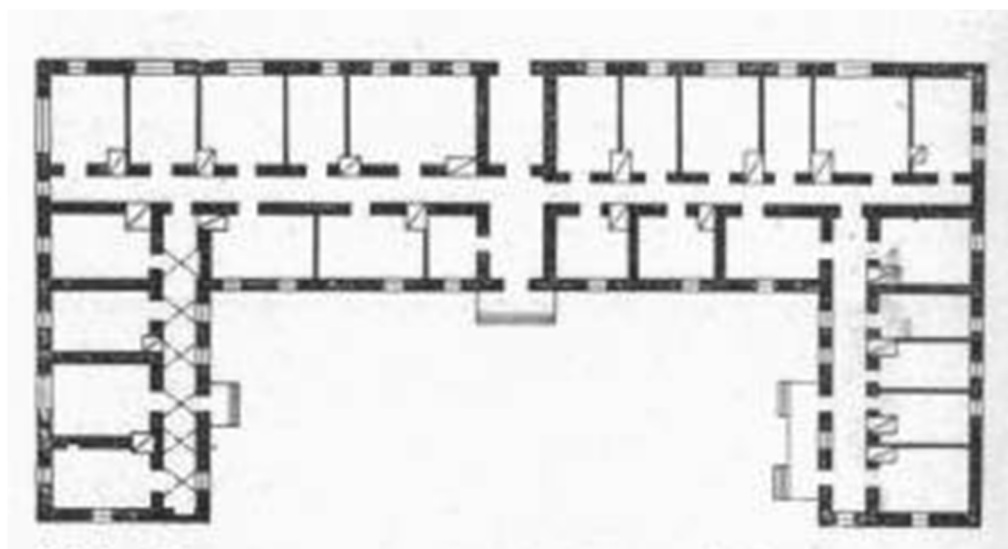


Рисунок 13. – План монастырского госпиталя

В 1924 – 1959 гг. Освея была центром района, в 1938 приобрела статус городского поселка. В Великую Отечественную войну с июля 1941 г. была оккупирована немецко-фашистскими захватчиками. В Освейском районе действовали многочисленные партизанские отряды, и в сентябре 1942 г. Освея была освобождена ими.

Но в феврале 1943 г. в ходе жестокой карательной антипартизанской операции, проведенной прибалтийскими и украинскими коллаборационистами, Освея была сожжена, погибло более половины довоенного населения. Освобождение произошло только в июле 1944 г.

Сейчас по данным на 2010 г. в г.п. Освея проживает всего 1,3 тыс. жителей и в 2007 г. Освея получила статус агрогородка (рис. 14).



Рисунок 14. – Современный вид Освеи

**Заключение.** На примере этого населенного пункта и некоторых других белорусских населенных пунктов (Друя, Лынтупы и т. д.), наблюдается некоторое невнимание общественности к проблемам населенных пунктов с уникальным историческим прошлым. Освея и многие другие небольшие населенные пункты Беларуси кажутся непримечательными, одновременно обладая удивительным прошлым, которое необходимо помнить, сохраняя и развивая историческое, культурное и архитектурное наследие страны.

При наличии идей реставрации, адаптации, инвестиций в инфраструктуру данного населенного пункта, Освея могла бы стать местом для ознакомления с историей Беларуси и отдыха жителей и гостей нашей страны.

Воссоздание, реконструкция, сохранение историко-культурного наследия важны для национального самосознания и, как вклад в повышение экономического развития нашей Беларуси.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Регионы Беларуси: энциклопедия : 7 т. / редкол.: Т.В. Велова [и др.]. – Минск : Беларусь. энцикл. им. П. Бровки, 2011. – Т. 2. – 640 с.
2. Татаринов, Ю.А. Города Беларуси. Витебщина / Ю. Татаринов. – Минск : Энциклопедикс, 2006. – 208 с.
3. Кулагін, А.М. Каталіцкія храмы Беларусі / А.М. Кулагін ; фатограф А.Л. Дыбоўскі, – Мінск : Беларус. Энцыклапедыя імя П. Броўкі, – 2088. – 488с.
4. Федорук, А.Т. Садово-парковое искусство Белоруссии. – Минск : Ураджай, 1989. – 247 с.
5. Самусик, А.Ф. Фундуш Гільзенаў-Шадурскіх у справе развіцця адукацыі ва Усходняй Беларусі ў канцы XVIII- пачатку XX стагоддзя / А.Ф. Самусик. – Минск : Палымя, 1982. –190 с.

## АНАЛИЗ ТИПОЛОГИИ ЗАСТРОЙКИ ЖИЛЫХ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДА ПОЛОЦКА

Я.Д. Филиппенко, А.А. Бакатович

Полоцкий государственный университет, Беларусь

e-mail: j.filipenka@psu.by

*В представленной статье описана методика определения и анализа таких важных показателей жилой застройки как площадь застройки, плотность населения и численность населения в зависимости от типов жилья на примере города Полоцка. Определение удельного веса этих показателей и распределения на территории города позволяет более осознанно подходить к решению ряда архитектурно-градостроительных проблем города Полоцка.*

*Ключевые слова: градостроительство, жилая застройка, площадь застройки, плотность населения, численность населения, типология застройки, город Полоцк.*

## THE ANALYSIS OF THE TYPOLOGY OF RESIDENTIAL BUILDINGS OF THE CITY OF POLOTSK

Y. Filipenka, A. Bakatovich

Polotsk State University, Belarus

e-mail: j.filipenka@psu.by

*The article describes the method of determining and analyzing such important indicators of residential development as the building area, population density and population depending on the types of housing on the example of Polotsk. Determination of the proportion of these indicators and distribution in the city allows a more conscious approach to solving a number of architectural and urban planning problems in the city of Polotsk.*

*Keywords: urban planning, residential development, built-up area, population density, population size, building typology, Polotsk city*

В данный момент город Полоцк, на ряду с Новополоцком и Новогрудком, является пилотным городов в рамках проекта «Поддержка зеленого градостроительства в малых и средних городах Беларуси», реализуемого Программой развития ООН (ПРООН) в партнерстве с Глобальным экологическим фондом (ГЭФ).

Для аналитического обзора состояния пилотных городов нами была разработана методика выполнения анализа характеристик и распределения различных типов застройки жилых территорий, в виде схем, диаграмм и табличных данных.

Для построения схем, отображающих типологию жилой застройки городов, а также схем плотности и численности населения в определенных районах города проведен комплекс подготовительных работ.

На первом этапе выполнена работа по подготовке подосновы, для чего использованы отдельные спутниковые снимки города высокого разрешения, которые сведены и скомпонованы в одну городскую карту высокого разрешения.

На втором этапе проведены натурные обследования городских жилых территорий для уточнения типологии и этажности застройки.

Исследовались, анализировались и сопоставлялись многочисленные карты и планы города (генеральный план, опорные планы, Googlemaps, Яндекс карты, Публичная земель-

но-информационная карта Беларуси УП "Проектный институт Белгипрозем". Минск, 2016), для выявления зонирования жилых территорий.

Для получения схемы типов жилья (рис. 1) на подоснове обозначали в соответствующих цветовых градациях различные типы жилой застройки. Такая схема зонирования необходима, в первую очередь, для определения плотности и численности населения, проживающих в том или ином районе города.

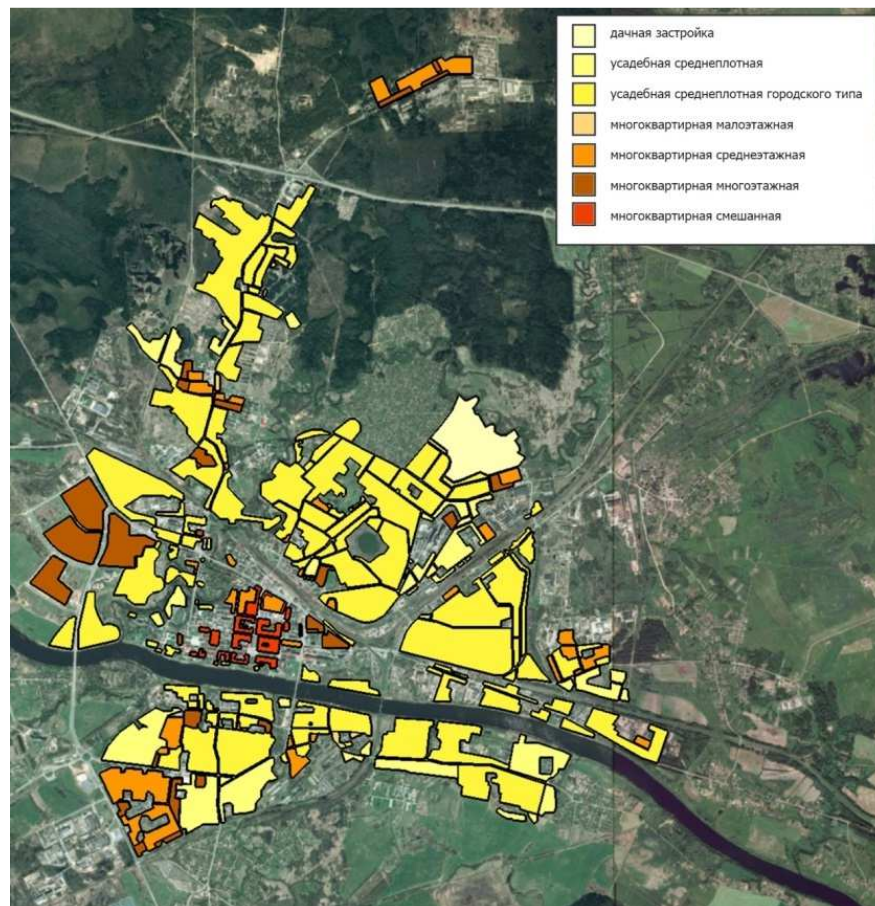


Рисунок 1. – Схема 1. Распределение типов жилой застройки (с градацией по плотности населения)

С этой целью определяли нормативную плотность населения в зависимости от типологии, опираясь на данные представленные в ТКП 45-3.01-116-2008 «Градостроительство. Населенные пункты. Нормы планировки и застройки» [1] и ТКП 45-3.01-117-2008. «Градостроительство. Районы усадебного жилищного строительства. Нормы планировки и застройки» [2] (табл. 1).

Таблица 1. – Нормативная плотность населения жилой застройки

Типы жилой застройки	Нормативная плотность, чел./га
Многоквартирная многоэтажная	145
Многоквартирная среднеэтажная	100
Многоквартирная малоэтажная	34
Многоквартирная смешанная	90
Усадебная среднеплотная городского типа (0,04–0,06 га)	65
Усадебная среднеплотная (0,06–0,10 га)	45
Дачная	20*



Для дачной застройки, несмотря на небольшие участки, условно приняли плотность 20 чел./га. Так как данная территория находится в черте города, то некоторая доля населения проживает там постоянно.

Из полученных данных схемы 1 жилая застройка города Полоцка представлена в основном усадебным типом (около 75 %). В меньшем количестве присутствует многоквартирный тип застройки, который территориально сосредоточен на севере (Боровуха 3), в западной (Аэропорт) и юго-западной (Мариненко) частях города. Многоквартирная застройка также небольшими участками встречается в массиве усадебной застройки (районы Громы, Новка, Шмидта, Кульнева).

Затем на схеме типов жилья выявляли территориальные (не административные) районы города (рис. 2). Границы этих районов были определены на основе планировочных ограничений, в том числе природных (магистраль, ж/д, реки, ручьи, овраги).

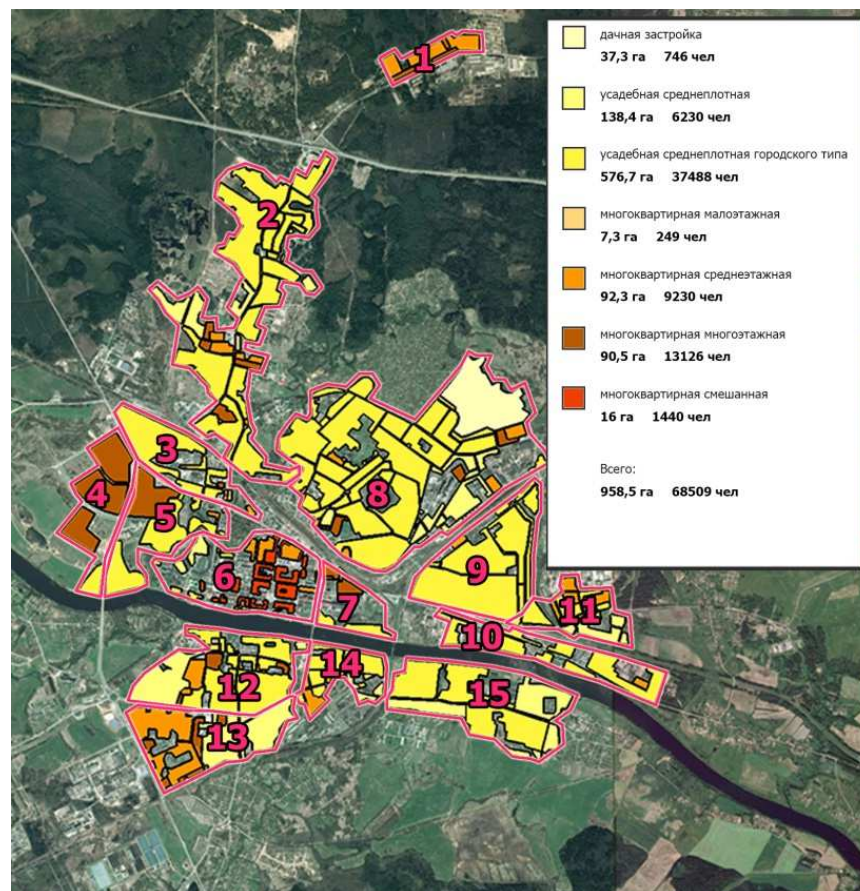


Рисунок 2. — Схема 2. Выявление условных территориальных районов

После чего каждый район города рассматривался отдельно. Рассчитывалась площадь жилой территории каждого из представленных в нем типов. В соответствии с нормативной плотностью населения, рассчитана численность населения, проживающего в каждом типе жилья в этом районе. Суммарная расчетная численность населения района, средняя плотность и суммарная расчетная площадь жилой территории района заносились в сводную таблицу.

В итоге, просчитав каждый из выделенных районов, определили суммарные расчетные численность населения и площадь жилых территорий, а также среднюю плотность населения.

Полученные данные сравнивали с данными представленными в Генеральном плане города Полоцка [3] (табл. 2).

Таблица 2. – Данные генплана и результаты исследования

Источник данных	Площадь, га	Численность населения, чел.
Полученные в результате исследования	958,5	68509
Генеральный план Полоцка	973,1	85000

Расхождение в значениях площади жилых территорий составило 1,5%, что принимаем за погрешность. Разница же в численности населения составила 16,5 тыс. чел., что, вероятно, связано с несоответствием принятой плотности населения фактической. Несмотря на это, данная методика позволила проследить количественные соотношения площади застройки, плотности и численности населения выделенных районов города (табл. 3).

Таблица 3. – Процентное соотношение площадей жилых территорий и численности населения по районам города

Территориальный район	% площади жилых территорий	% численности населения
Район 1	2	3
Район 2	15	14,4
Район 3	3,8	3,7
Район 4	4,2	7,8
Район 5	4,8	6,2
Район 6	3,9	4,6
Район 7	1,4	2
Район 8	23,2	19
Район 9	8,3	7,6
Район 10	3,4	3,2
Район 11	3,3	3,2
Район 12	8,6	8,2
Район 13	6,8	7,6
Район 14	3,3	3
Район 15	8	6,5
Всего:	100	100

По данным таблицы 3 построены диаграммы, отображающие удельный вес различных типов жилой застройки в общей площади и численности населения (рис. 3, 4).

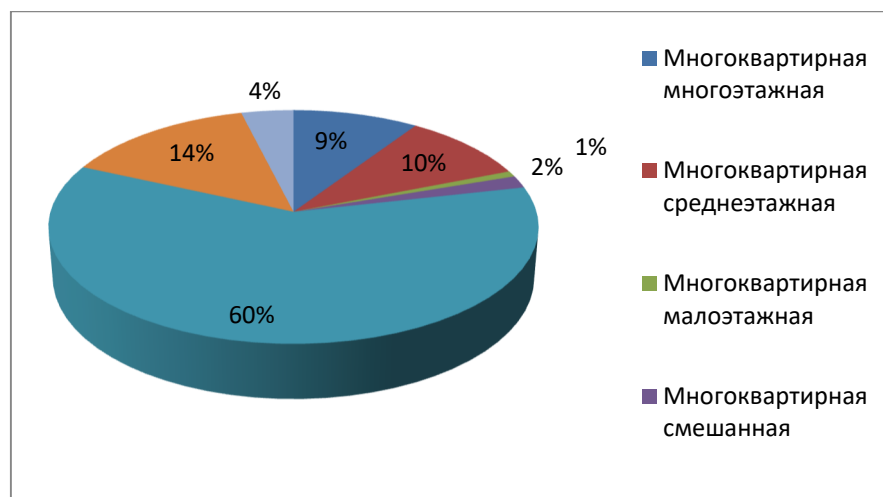


Рисунок 3. – Удельный вес типов жилой застройки в общей площади

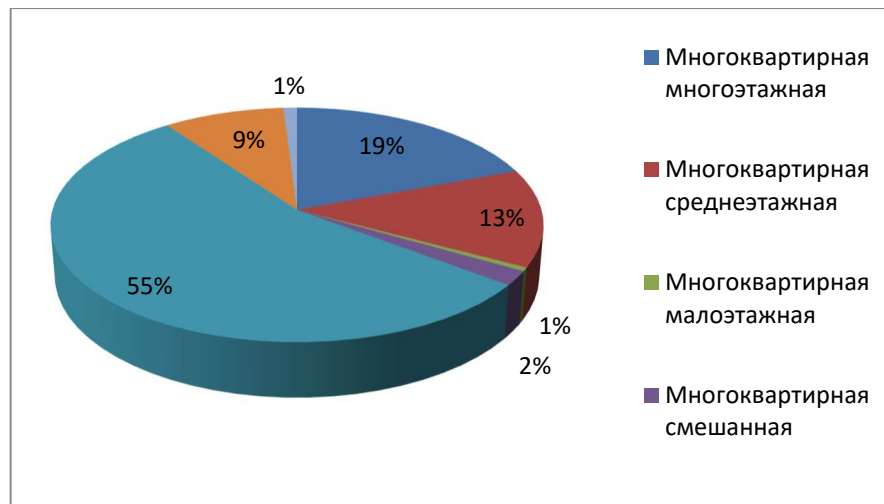


Рисунок 4. – Удельный вес типов жилой застройки по численности населения

Дополнительно, для определения динамики роста жилых территорий за последние 30–40 лет, выполнили схему (рис. 5), отображающую годы строительства многоквартирной застройки (т.к. территории усадебной застройки увеличиваются постепенно на протяжении большого временного периода).

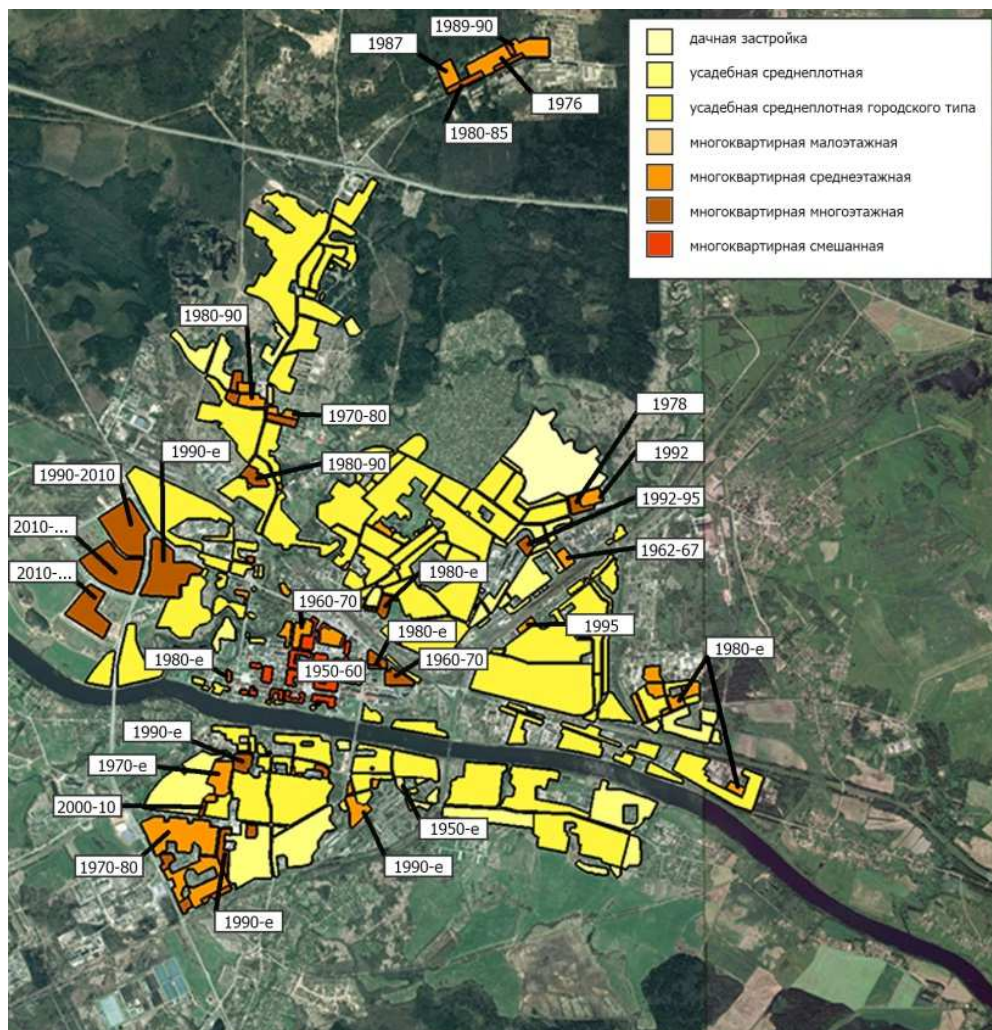


Рисунок 5. – Схема 3. Годы строительства многоквартирной жилой застройки

Полученные результаты и выполненные схемы позволяют более точно определить направления и особенности развития транспортных путей (их маршруты, мощности и типы), инженерных сетей и коммуникаций (количество потребителей на тех или иных территориях) и т.д. для города в ближайшей перспективе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ТКП 45-3.01-116-2008 (02250) : Градостроительство. Населенные пункты. Нормы планировки и застройки.
2. ТКП 45-3.01-117-2008 (02250) : Градостроительство. Районы усадебного жилищного строительства. Нормы планировки и застройки.
3. Генеральный план г. Полоцка. Корректировка. 2017 г. (разработан УП «БелНИИП-градостроительства», 2015 г.)



## АРХИТЕКТУРА ИСТОРИЧЕСКИХ УСАДЕБ ПОЛОЦКОГО РАЙОНА

Р.М. Платонова

Полоцкий государственный университет, Беларусь

e-mail: r.platonowa@psu.by

*Рассмотрены вопросы истории возникновения, сохранения и использования исторических дворцово-парковых и усадебно-парковых комплексов, культовых сооружений в Полоцком районе Витебской области. Усадьбы рассматриваются как сложные комплексы соподчиненных архитектурных и природных элементов. На примере усадеб Я.В. Лисовского, А.А. Римского-Корсакова и Поклевских-Козелл показано, что старинные усадьбы в культурно-историческом наследии Беларуси занимают особое место — их владельцы внесли существенный вклад в развитие белорусских земель, белорусского народа, национальной культуры и искусства. Установлено, что указанные архитектурные объекты нуждаются в реконструкции и реставрации. Предложено использовать исторические усадьбы как культурно-туристические объекты.*

*Ключевые слова: комплексы, дворцово-парковые, усадебно-парковые, садово-парковые, культовые сооружения, усадьбы.*

## ARCHITECTURE OF THE HISTORICAL MANAGEMENT OF POLOTSK DISTRICT

R. Platonova

Polotsk State University, Belarus

e-mail: r.platonowa@psu.by

*Questions of the history of the origin, preservation and use of historical palace and park and manor and park complexes, religious buildings in the Polotsk district of the Vitebsk region are considered. Manors are considered as complex complexes of subordinate architectural and natural elements. On the example of the manors of Y.V. Lisovskiy, A.Rimsky-Korsakov and Poklevsky-Kozell it was shown that the old manors in the cultural and historical heritage of Belarus occupy a special place - their owners have made a significant contribution to the development of the Belarusian lands, the Belarusian people, the national culture and art. It is established that these architectural objects need reconstruction and restoration. It is proposed to use historical estates as cultural and tourist sites.*

*Keywords: complexes, palace-steal, convenient-park-yours, garden and parking, culture facilities. manor.*

Полоцкий район Витебской области является ярким примером сочетания традиций и культур Восточной и Западной Европы, богат на архитектурные памятники и достопримечательности. В Полоцком районе сохранилось множество церквей, костелов и исторических усадеб, многие из них находятся в весьма хорошем состоянии. К памятникам архитектуры, усадебно-паркового и садово-паркового искусства этого района относятся усадьбы Я.В. Лисовского в д. Близница, А.А. Римского-Корсакова в д. Бездедовичи и Поклевских-Козелл в д. Быковщина.

Усадьба Якова Викентьевича Лисовского XIX — нач. XX вв. расположена в деревне Близница (раньше Двор Вороницы, рис. 1). Во времена крепостного права барин Яков имел более 500 крестьянских душ. Семья Лисовских постоянно не проживала в поместье, так как имела большой городской дом в России [1–2].



а



б

Рисунок 1. – Усадебный дом Я.В. Лисовского:  
а – в наши дни; б – в 1949 г.

Я.В. Лисовский был человеком образованным и известным среди дворян, знал историю края, ценил исторические памятники. Был избран предводителем дворян Лепельского уезда. Сам род Лисовских известен с XVI века. Об этом свидетельствует их родовой герб, похожий на древнего рыцаря со щитом, шлемом и тяжелыми доспехами, что указывает на его древность и воинственность (рис. 2).

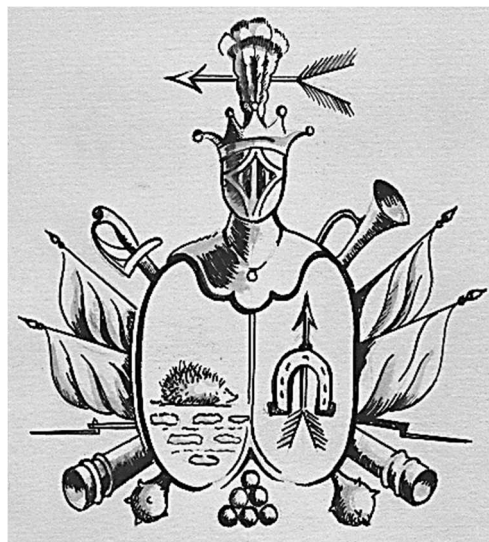


Рисунок 2. – Герб рода Лисовских

В 70-х годах XIX века из-за недостатка денежных средств он перестроил дом в сыроплавильный завод. Однако семья Лисовских стала редко посещать Близницу. Последней хозяйкой поместья была Мария Лисовская, довольно своенравная женщина, которая жестоко наказывала крестьян, незаконно рубивших ее лес. Похоронена неподалеку, в д. Заскорки на католическом кладбище.

После революции в поместье была коммуна, а затем в барском доме устроили маленький завод по перегонке молока. Позднее господский дом перестроили в интернат для инвалидов, который просуществовал до 80-х годов XX века. Некоторое время дом пустовал, но в 1994 году открыли школу искусств, сделав ремонт. В усадьбе в настоящее время кроме дома сохранились, но требуют восстановления: мельница, хозпостройки и парк.

Усадебно-парковый комплекс А.А. Римского-Корсакова, родственника известного композитора Н.А. Римского-Корсакова, расположен в деревне Бездедовичи [3–5]. Сохранился в хорошем состоянии. От первоначальной постройки утрачены только балкон на вто-

ром этаже и фонтан. Усадьба создана в начале XX века. Включает усадебный дом, пейзажный парк с системой прудов и хозяйственные постройки.

Центром ансамбля является двухэтажный усадебный дом, расположенный на невысоком холме. Дом выстроен из камня, с мощными стенами. Композиция дома основана на использовании разных по форме ризалитов, выступающих из основного объема. Фасады декорированы разными оконными проемами, наличниками и т. д. (рис. 3).



Рисунок 3. – Главный фасад усадебного дома А.А. Римского-Корсакова

Усадьба – памятник архитектуры эпохи классицизма, охраняется государством. Сейчас там размещается больница сестринского ухода. В настоящее время неплохо сохранились хозяйственные постройки, выполненные из красного кирпича и некогда красивый парк пейзажного типа с прудами и фонтанами, был разбит со стороны южного фасада дома. Пруд совсем зарос, а парк трудно проходим из-за обилия кустарника.

Недалеко от усадьбы А.А. Римского Корсакова в деревне Мыщено до наших дней сохранился необычный православный храм шатрового типа (рис. 4). Расположен он на сельском кладбище. Построена Свято-Иверская церковь в 1908 – 1910 годах как родовая усыпальница Римских-Корсаковых. Строительство профинансировал хозяин усадьбы.



а



б

Рисунок 4 – Свято-Иверская церковь:  
а – фасад с главным входом; б – оконный проем



Свято-Иверская церковь памятник архитектуры псевдорусского стиля. Прямоугольный в плане объем завершен восьмигранным барабаном, шатер которого завершен маковкой и декорирован кокошниками. Вход выделен массивным шатровым рундуком. Насыщенное колористическое решение достигнуто сочетанием полихромной бутовой кладки стен и краснокирпичной кладки архитектурного декора.

В советские годы церковь была запущена и вплоть до 90-х годов прошлого века пребывала в плачевном состоянии. Кровля храма протекала, на ней росли кустарники. В 1990-е годы церковь начали реставрировать, внутри храма провели небольшой косметический ремонт. Даже в нынешнем состоянии церковь завораживает. Ее высота вместе с крестом около 25 метров. Вход венчает массивное арочное крыльцо на фигурных колоннах. Есть подвал. Утрачен красивый иконостас из белой керамики. Церковь передана епархии и охраняется государством, но очевидно средств на ее полное восстановление пока не хватает.

Необходимо отметить, что Александр Александрович Римский-Корсаков (17.07.1849—13[26].09.1922), оставил после себя на полоцкой земле добрую память. Кроме построенного садово-паркового комплекса и православной Свято-Иверской церкви, на его средства были возведены церковь в деревне Дубровка (разрушена в 1960-е годы) и школа. Был он также почетным опекуном Дубровского народного училища, членом Государственного Совета, шталмейстером Высочайшего двора, сенатором, активным деятелем патриотического движения в России и в эмиграции. После революции 1917 года Римский-Корсаков участвовал в Белом движении. В 1920 году эмигрировал в Берлин. Награжден всеми российскими орденами, вплоть до ордена Белого Орла.

К памятникам архитектуры и усадебно-паркового искусства относится усадьба Поклевских-Козелл, построенная в 1840 годах. Расположена вблизи городского поселка Ветрино в деревне Быковщина (рис. 5). Самым известным владельцем этого имения был Альфонс Фомич Поклевский-Козелл (родился в 1810 г.). Образование Альфонс получил в Полоцком высшем пиарском училище и в Виленском университете.

В культурно-историческом наследии Беларуси усадьба Поклевских-Козелл занимает особое место. Кроме нового здания школы, все остальные были построены ещё при старом хозяине имения. Сохранилось не только здание усадьбы и флигеля, но и большое количество хозяйственных построек. Лишь некоторые из них в аварийном состоянии.



а



б

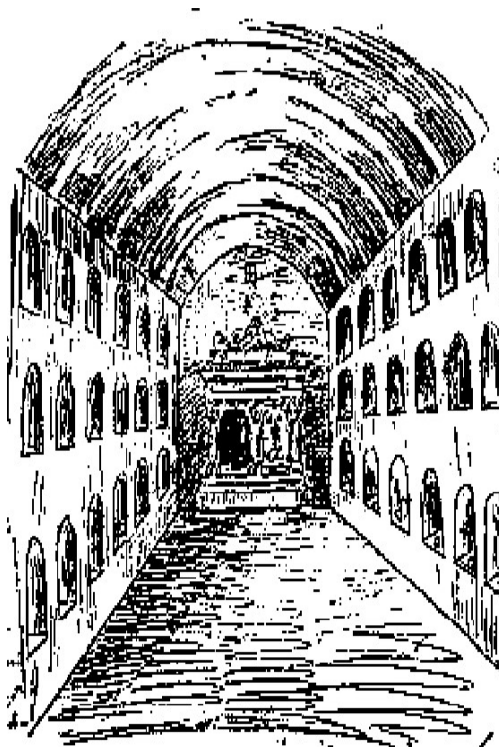
Рисунок 5. – Усадебно-парковый комплекс Поклевских- Козелл:  
а – каменная часть; б – деревянная половина



Нет сомнений, что Альфонс Фомич не забывал своё родное имение — Быковщину. Похоронен он был на родине. Его родным пришлось долго просить разрешения на возведение памятника-каплицы над его могилой.



а



б

Рисунок 6. — Макет каплицы (а) и погребальный склеп (б) Поклевских-Козелл

Храм выстоял в Первую мировую войну и революцию. Разрушили его при возведении школы, на строительство которой потребовались камни. Останки, которые хранились в подземной части костёла, были вывезены в деревню Старухи для перезахоронения. От храма сейчас почти ничего не осталось. Можно увидеть лишь засыпанную грунтом подземную часть склепа.

В настоящее время жилой дом, флигель, хозяйственные постройки, подземная часть фамильного склепа, парк взяты под защиту государства как памятники архитектуры и паркового хозяйства панской усадьбы XIX века.

В заключение необходимо отметить, что выполненное исследование архитектуры исторических памятников Полоцкого района на примерах усадеб Я.В. Лисовского, А.А. Римского-Корсакова и Поклевских-Козелл указывает на необходимость пристального внимания вопросам их сохранения, реконструкции и реставрации с целью использования в качестве культурно-туристических объектов [6]. Особенно в этом нуждаются такие объекты, как хозяйственные постройки во всех рассмотренных усадьбах, мельница в усадьбе Я.В. Лисовского и Свято-Иверский храм в усадьбе А.А. Римского-Корсакова. Ведь степень сохранности, благоустройство памятников и историко-градостроительных заповедников, их доступность для туризма благоприятствуют общению разных стран, в значительной степени формируют мнение о благополучии государства, что в конечном итоге способствует развитию деловых и культурных контактов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Близница [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://globus.tut.by/bliznica/>. – Дата доступа: 23.02.2018.
2. Барышнікава, Ю.С. Гісторыя памесця пана Якава Лісоўскага ў в. Блізніца Полацкага раёна [Электронный ресурс] / Ю.С. Барышнікава. – Режим доступа: <http://kzbydocs.com/docs/3688/index-493597-2.html>. – Дата доступа: 10.08.2013.
3. Стогов, Д.И. Он заслужил большую популярность среди монархистов. Александр Александрович Римский-Корсаков (1849 — 1922) // Воинство святого Георгия: Жизнеописание русских монархистов начала XX века / сост. и ред.: А. Д. Степанов, А. А. Иванов. – СПб, 2006. – 215 с.
4. Римский-Корсаков Александр Александрович [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.hrono.ru/biograf/bio\\_r/rim\\_kors](http://www.hrono.ru/biograf/bio_r/rim_kors). – Дата доступа: 20.01.2000.
5. Свято-Иверская церковь в Мыщено [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geocaching.su/>. – Дата доступа: 20.04.2012.
6. Потаев, Г.А. Ревитализация исторических усадеб как культурно-туристских объектов [Электронный ресурс] Г.А. Потаев. – Режим доступа: : <https://ais.by/story/662>. – Дата доступа: 21.10.2005.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СРЕДЫ РАВНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ В ПОЛУЧЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ НА ПРИМЕРЕ БРУ

*О.В. Голушкова, А.А. Политыко*

Белорусско-Российский университет, Могилёв, Беларусь

email: f\_st@bru.by

*Представлены основные мероприятия, обеспечивающие организацию безбарьерной среды в соответствии с нормативно - технической базой Республики Беларусь.*

*Рассматривается возможность обеспечения среды равных возможностей при получении высшего образования физически ослабленными лицами в главном корпусе Белорусско-Российского университета.*

*Ключевые слова: формирование доступной среды, обеспечение жизнедеятельности, физически ослабленные лица, пандус, поручни.*

## DESIGNING THE ENVIRONMENT OF EQUAL OPPORTUNITIES IN OBTAINING EDUCATIONAL SERVICES BY THE EXAMPLE

*O. Golushkova, A. Politico*

Belarussian-Russian University, Mogilev, Belarus

email: f\_st@bru.by

*The main activities providing organization of a barrier-free environment in accordance with the regulatory and technical base of the Republic of Belarus are presented.*

*The possibility of providing an environment for equal opportunities in obtaining higher education by physically weakened persons in the main building of the Belarusian-Russian University is considered.*

*Keywords: formation of accessible environment, life support, physically weakened persons, ramp, handrails.*

Доступность окружающей среды для всех категорий граждан является важной составляющей их полноценной жизнедеятельности. К осознанию проблем создания безбарьерной среды за рубежом пришли после Второй мировой войны, когда повсюду появилось большое количество людей с различными физическими и психологическими отклонениями. Поэтому в Совете Европы в начале 1950-х годов начинает работать комиссия, занимающаяся вопросами формирования безбарьерной среды обитания для людей с ограниченными возможностями.

В Европе в 1960-1970-е года появились нормы, регламентирующие архитектурную деятельность в области обеспечения требований инвалидов к среде обитания. В СССР первые рекомендации по архитектурному проектированию безбарьерной среды были разработаны в 1980-х годах [1].

Впервые в Республике Беларусь законодательно начал решаться вопрос о создании условий беспрепятственного доступа инвалидов к социальной инфраструктуре в 2000 году с принятием "Закона о социальной защите инвалидов в Республике Беларусь". В настоящее время в Республике Беларусь проживает 9,5 млн. человек, из них 2,4 млн. пенсионеров по возрасту, 506,7 тыс. инвалидов, 306,7 тыс. детей в возрасте до 3 лет, 122,1 тыс. детей в воз-

расте до 18 лет с особенностями психофизического развития. Доля указанной группы граждан составляет 35 процентов от общей численности населения. В последние годы в Республике Беларусь ведется активная государственная политика в области обеспечения доступной среды для жизнедеятельности физически ослабленных лиц: принят ряд законов, государственная программа, утвержден и введен в действие с 1 августа 2010 года государственный стандарт и технический регламент, внесены изменения в строительные нормы. Все эти нормативные акты устанавливают основные положения среды обитания инвалидов различных категорий с учетом обеспечения им возможности самостоятельной жизнедеятельности.

Остановимся подробнее на вопросах обеспечения среды равных возможностей для маломобильных групп населения при удовлетворении потребности в получении высшего образования в городе Могилеве на примере "Белорусско-Российского университета".

Формирование среды равных возможностей в получении образовательных услуг базируется на действующих нормативно-технических правовых актах и Государственной программе по созданию безбарьерной среды жизнедеятельности физически ослабленных лиц на 2011-2015 гг. Этой программой предусматривалось проведение мероприятий проектного и строительного характера для обеспечения полноправного участия инвалидов в жизни общества и возможности реализации своих прав, предусмотренных законами Республики Беларусь [2]. Достижение поставленной цели возможно при увеличении количества объектов социальной и другой инфраструктуры, приспособленных к доступу различных категорий физически ослабленных лиц. Проведение работ, обеспечивающих беспрепятственный доступ к зданиям и внутренним помещениям, предусматривается провести при реконструкции или ремонте.

Могилевский машиностроительный институт, не так давно переименованный в "Белорусско-Российский университет", является одним из старейших высших учебных заведений в г. Могилеве. В настоящее время он состоит из 6 корпусов. Здание первого корпуса Белорусско-Российского университета было построено к осени 1939 года как главный корпус НКВД в г. Могилеве. С 1961 года и по настоящее время оно является главным корпусом БРУ. С тех пор первый корпус функционирует практически без каких-либо конструктивных изменений внутреннего пространства. Изначально при проектировании и строительстве корпуса не были обеспечены требования по доступности для маломобильных групп населения. В настоящее время в университете обучается один инвалид-колясочник, поэтому весьма актуальным является организация безбарьерной среды.

Корпус представлен пятиэтажным зданием с высотой этажа 3,3 м. Этажи связаны между собой двухмаршевой лестницей. Корпус располагает двумя входами: один со стороны главного фасада с пригласительным маршем без пандуса, другой – со стороны бокового фасада -пригласительный марш с двумя пандусами (рис. 1).

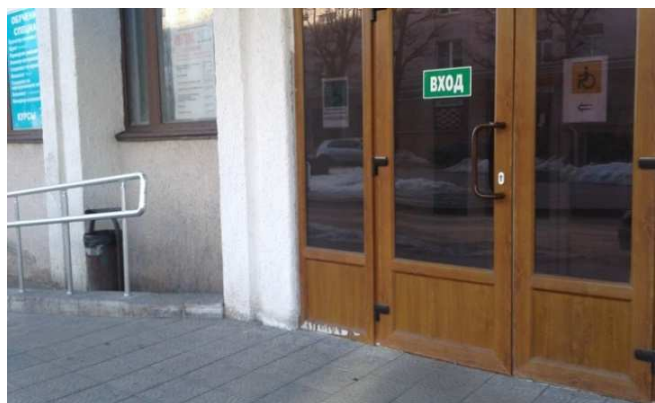
Как мы видим из рисунка 1, доступ к главному корпусу БРУ обеспечивается двумя пандусами длиной 3,2 м, шириной 1,2 м имеющими уклон 1,25% с перилами, установленными с двух сторон, бортики по краям имеют высоту 50 мм. Пандусы, как и крыльцо, облицованы рифленой плиткой со швами толщиной 10 мм, что полностью соответствует требованиям нормативов [3].

Отступления от нормативов в данном узле представлены в таблице 1.

Заполнение входного дверного проема выполнено в виде распашной двери на петлях одностороннего действия с открыванием «на себя» и фиксаторами положения. Входная группа имеет яркое цветовое решение относительно фасада здания. Дверной проем в свету имеет ширину более 0,9 м, дверные ручки размещены на высоте 1,05 м, что также соответствует нормативам, отступления состоят в наличии незначительного порога до 2 мм.



а



б

Рисунок 1. – Организация входа в университет:  
а – с главного фасада; б – с бокового фасада пригласительный марш с пандусами

Таблица 1 – Величины отступлений

Характеристика	Требования по нормативу	Величина по факту
Длина поручней перил	3,8 м	3,2 м
Цвет покрытия площадок на подходах к пандусам	Должен обеспечиваться контраст в цвете с поверхностью пандуса	отсутствует
Высота над поверхностью площадки поручней перил	0,9 м	1,05 м

Далее по пути следования мы попадаем в тамбур, который полностью соответствует требованиям норм. Из тамбура мы направляемся в просторный вестибюль. В здании БРУ он выполнен в разных уровнях с разностью в несколько ступеней. Для преодоления данной вертикальной преграды представители маломобильных групп могут воспользоваться купленным администрацией университета лестничным подъемником с помощью специально закрепленного за аппаратом социального работника – вахтера (рис. 2).



Рисунок 2. – Фото лестничного подъемника Клаймбер 1

Конструкция этого аппарата надежная и массивная, работает с напряжением 12 В и может быстро приспособиться к потребностям пользователя. Обладает эксплуатационным периодом в 30 минут на одну зарядку. Может двигаться без гусениц по ровной поверхности.



На втором уровне вестибюля в непосредственной близости от него находится туалет, адаптированный к возможностям физически ослабленных лиц и гардероб. Движение к этим помещениям осуществляется через двойной пандус. Первый ведет на площадку к туалету и ко второму пандусу, через который можно попасть в гардероб (рис. 3). Основное отступление от норм, выявленное в первом пандусе состоит в напольном покрытии самого пандуса – скользкая плитка, во втором пандусе – отсутствие перил с поручнями. В гардеробе высота рабочей поверхности превышает норму на 20% и составляет 1 м. Но эта проблема решена для обучающегося в настоящий момент в университете инвалида-колясочника, прикреплением к нему социального работника сопровождающего его в этом узле здания.



Рисунок 3. – Двойной пандус в вестибюле



Рисунок 4. – Междуэтажная лестница

Пути движения внутри здания проходят по горизонтальным коммуникационным пространствам - коридорам и вертикальным – лестницам (рис. 4). Все лестницы университета соответствуют нормам, но не используются маломобильными группами, так как для них обучение организовано на первом этаже. Коридоры первого этажа просторные – шириной 2 м и имеют соответствующее нормам напольное покрытие. В здании главного корпуса имеются шахты грузопассажирских лифтов, но лифты демонтированы по экономическим предпосылкам в далекие 1990-е и шахты не используются по назначению. В будущем при проведении реконструктивных мероприятий в здании эти конструкции можно оживить.

Сантехнический узел для физически ослабленных лиц выполнен в соответствии с требованиями к санузлам, имеет свободное пространство с одной стороны от унитаза для размещения инвалидной коляски. Размер дверного проема более 0,9 м в свету, отметка верха сидения унитаза составляет 0,6 м от пола. Пространство рядом с унитазом обрамляется поручнями, один из них должен быть откидной, но в университете откидной поручень еще не установлен.

Все выявленные нами недостатки при проектировании среды равных возможностей для маломобильных групп в Белорусско-Российском университете не сложно устранить при проведении ремонтных работ в здании, хотя и потребуются некоторые экономические вложения.



В настоящее время строится новый корпус БРУ, который спроектирован с учетом всех современных требований норм с точки зрения обеспечения качества организации безбарьерной среды.

Эффективность безбарьерной среды в учреждениях образования заключается в создании дополнительных мест для набора студентов, в снижении травматизма, привлекательности университета как среды обучения и повышения уровня востребованности учреждения образования. В связи с этим в будущем количество и качество элементов безбарьерной среды в нашем университете должно возрасти.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сафронов, К.Э. Особенности формирования доступной среды обитания / К.Э. Сафронов // Вестник СибАДИ. – 2008. – № 3(9). – С. 7–11.
2. О Государственной программе по созданию безбарьерной среды жизнедеятельности физически ослабленных лиц на 2011 – 2015 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь № 1602 от 01.11.2010.
3. Среда обитания физически ослабленных лиц. Основные положения : СТБ 2030-2010. – Минск : Госстандарт, 2010. – С. 26.

Секция II  
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ,  
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЁТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 624.012.454

ПРОЧНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОГО МУФТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ СТЕРЖНЕВОЙ АРМАТУРЫ

В.С. Гарунович, А.С. Аль Нахди

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.nahdi@psu.by

*Целью представленной в данной работе ставилось получение экспериментальных данных о прочности безсварного стыкового муфтового соединения арматуры.*

*Ключевые слова: муфтовое соединение, арматура, прочность на сжатие и растяжение.*

STRENGTH OF MECHANICAL COUPLING CONNECTION OF RAIL FITTINGS

V. Harunovich, A.S. Al Nahdi

Polotsk State University, Belarus

email: a.nahdi@psu.by

*The purpose presented in this paper was to obtain experimental data on the strength of an unshifted butt-joint coupling of reinforcement.*

*Keywords: box joint, reinforcement, compression and tensile strength.*

Выбор связующего материала в составе стыка в виде полимерной композиции на основе эпоксидной смолы обусловлен возможностью получения высокопрочного быстро-твердеющего в течение суток материала. Длина соединения в данном исходном сочетании принята равной 250 мм (10 диаметров стыкуемых стержней) на основании результатов испытаний при растяжении образцов соединений с разной длиной муфты. При длине трубы – муфты 10·Ø25 испытания показали стабильные значения разрыва по среднему сечению соединения при усилиях, соответствующих временному сопротивлению стали трубы.

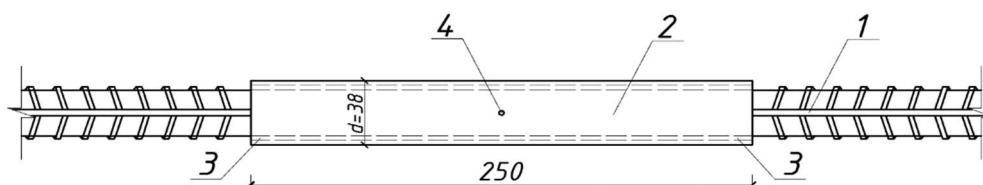


Рисунок 1. – Конструкция муфтового соединения стержневой арматуры:  
1 – стыкуемые арматурные стержни  $d = 25$  мм; 2 – муфта из трубы  $d = 38$  мм;  
3 – компаунд эпоксидный; 4 – отверстие диаметром 3 мм

Предлагаемая конструкция с учетом марки стали С235, используемой при изготовлении трубы соединения предлагала длину анкеровки  $5d$  (125 мм). В ходе предварительных испытаний на растяжение было испытано три образца. Испытания производились на разрывной машине Р-50 при постоянной скорости нагружения (рис. 2, а).

Испытания на сжатие производилось на прессе П-125 при постоянной скорости нагружения. Для проведения опытов были изготовлены специальные стальные основания призмы, размером  $200 \times 200 \times 50$ , по две на каждый конец арматуры. В одной из каждой пары призм сверлилось отверстие, в последствии призмы скреплялись болтами. В отверстие призмы вставлялся строго в вертикальном положении арматурный стержень и крепился эпоксидной смолой, затем аналогичная операция проделывалась с другим концом арматуры. Общий вид конструкции в сборе представлен на рисунке 2, б.

Наблюдение за линейными перемещениями стыкуемых стержней относительно муфты осуществлялось рычажными механическими тензометрами Гугенбергера с точностью 0,001 мм.

На растяжение и сжатие испытывалось 5 образцов. Стержни, испытываемые на растяжение имели номера 1Р, 2Р, 3Р, 4Р, 5Р. Стержни, контролируемые на сжатие 1К, 2К, 3К, 4К и стержни с муфтами 1С, 2С, 3С, 4С, 5С. Нагружение осуществлялось пошагово с интервалом 25 кН на сжатие и 10 кН на растяжение.

Результаты проведенных испытаний приведены в таблице 1.

При сжатии деформации в сечениях муфты значительно меньше деформаций стыкуемых стержней на всех этапах нагружения. Объяснением этому служит меньшая интенсивность напряжения на большей площади сечения. В переходных зонах, в начале и в конце муфты, образуется градиент деформаций, связанный с процессом перераспределения усилий между стыкуемыми стержнями и муфтой. Именно в этих зонах наблюдается искривление образца в момент потери устойчивости при достижении предельных усилий на сжатие.



а



б

Рисунок 2. — Испытуемый образец в разрывной машине (а),  
общий вид механического соединения в прессе (б)

Таблица 1. – Сводная таблица испытаний механических соединений арматуры

Сжатие		Вид разрушения	Растяжение		Вид разрушения
№ образца	Разр. нагрузка		№ образца	Разр. нагрузка	
1С	256кН	Потеря устойчивости	1Р	212кН	выдергивание стержня
2С	256кН	Потеря устойчивости	2Р	210кН	выдергивание стержня
3С	276кН	Потеря устойчивости	3Р	230кН	выдергивание стержня
4С	269кН	Потеря устойчивости	4Р	240кН	выдергивание стержня
5С	270кН	Потеря устойчивости	5Р	240кН	выдергивание стержня

При растяжении, на начальных стадиях нагружения до  $0,5N_{\max}$  характер распределения деформаций по длине стыка аналогичен характеру распределения при испытаниях на сжатие. На более высоких этапах нагружения, приближающихся к критическим, отчетливо проявляется зона анкеровки, проявляющееся за счет работы сил сцепления на участках интенсивной передачи усилий между стержнями и муфтой. Также на высоких стадиях нагружения образуется зона нелинейного опережающего деформирования середины стыка, где в дальнейшем вследствие достижения временного сопротивления стали и происходит разрыв муфты.

Проведя данное исследование можно сделать следующие выводы:

- испытания на растяжение предлагаемой конструкции механического соединения в принятой комплектации показали стабильные значения усилий разрыва по среднему сечению, соответствующие временному сопротивлению стали трубы муфты;
- предельная сжимающая нагрузка при потере устойчивости опытных образцов стыка имела значения, близкие к результатам испытания на растяжение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Узел стыкового соединения стержней арматуры в сжатых железобетонных элементах / С.А. Мадатян [и др.] // Бетон и железобетон. – № 2. – 2008. – с. 2–5.

## ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ НА КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ С ПОДЗЕМНЫМИ ЭТАЖАМИ

Е. Генина, Ю. Рыбаков

Ариэльский университет, Израиль

email: evgenyag@ariel.ac.il, ribakov@ariel.ac.il

*В настоящее время большинство зданий проектируются в соответствии с требованиями эксплуатации. Условия строительства обычно не учитываются при проектировании. Однако условия возведения и методы производства работ влияют на конструктивную схему и нагрузки элементов здания, и должны быть приняты во внимание на стадии проектирования. Авторы предлагают новый подход к проектированию и строительству многоэтажных зданий, основанный на проектировании несущих элементов как в стадии строительства, так и в стадии эксплуатации здания в течение его срока службы. Настоящая работа посвящена реальному проекту такого здания, которое было построено в стесненных условиях строительной площадки.*

*Ключевые слова: расчет и проектирование железобетонных элементов, варианты загрузки, внутренние усилия, расчетные схемы.*

## EFFECT OF CONSTRUCTION WORKS' METHODS ON STRUCTURAL DESIGN OF MULTISTORY BUILDING WITH BASEMENTS

E Genin, Y. Ribakov

Ariel University, Israel

email: evgenyag@ariel.ac.il, ribakov@ariel.ac.il

*Presently most of buildings are constructed according to design solutions that are kept before the construction is started and require further updatiry up to final stage of construction. The construction works conditions are usually not considered in the design. However, these conditions affect the design and should be taken into account. The authors propose a new approach to design and construction of multistory buildings that is based on design of structural elements at construction and using the building during its lifetime. The present paper is focused on a real project of such building that was constructed in restricted construction site condition. The study presents the effect of construction works' method on structural solutions suitable for reinforced concrete elements (RC*

*Keywords: RC elements design, loading condition, internal forces, design schemes, constructions works method.*

В настоящее время строительство новых зданий в условиях городской застройки ведется в весьма стесненных условиях. Строительные площадки окружены существующими многоэтажными зданиями. Подземные коммуникации проходят как по самой территории, отведенной под застройку, так и в непосредственной близости от ее границ. Кроме того,

строительство ведется рядом с оживленными городскими магистралями, которые невозможно перекрыть даже в ночное время.

Как правило, здания проектируются в расчете на традиционные методы строительства. При расчете и проектировании железобетонных несущих конструкций учитываются нагрузки в стадии эксплуатации, применяются сборные или монолитные перекрытия по неразрезным балкам, опертые на монолитные стены и колонны. Подземная часть здания проектируется с опорой на железобетонное шпунтовое ограждение по всему периметру участка, отведенного под застройку и внутренние колонны. Железобетонная рампа, опирающаяся на колонны и стены, спускается в подвальные этажи здания.

Однако при строительстве 10-ти этажного офисного здания с 4 подземными этажами в Тель Авиве стесненные условия строительства диктовали использование нестандартных решений при возведении здания. Невозможно было откопать котлован сразу на всю глубину по всей площади участка для подвальных этажей подземной стоянки. Из-за проходящей рядом линии электропередач и соседних зданий, было невозможно установить башенный кран. Улица с оживленным движением по фасаду здания не позволяла разместить грузовики и автомобильный кран вне пределов стройплощадки (рис. 1).

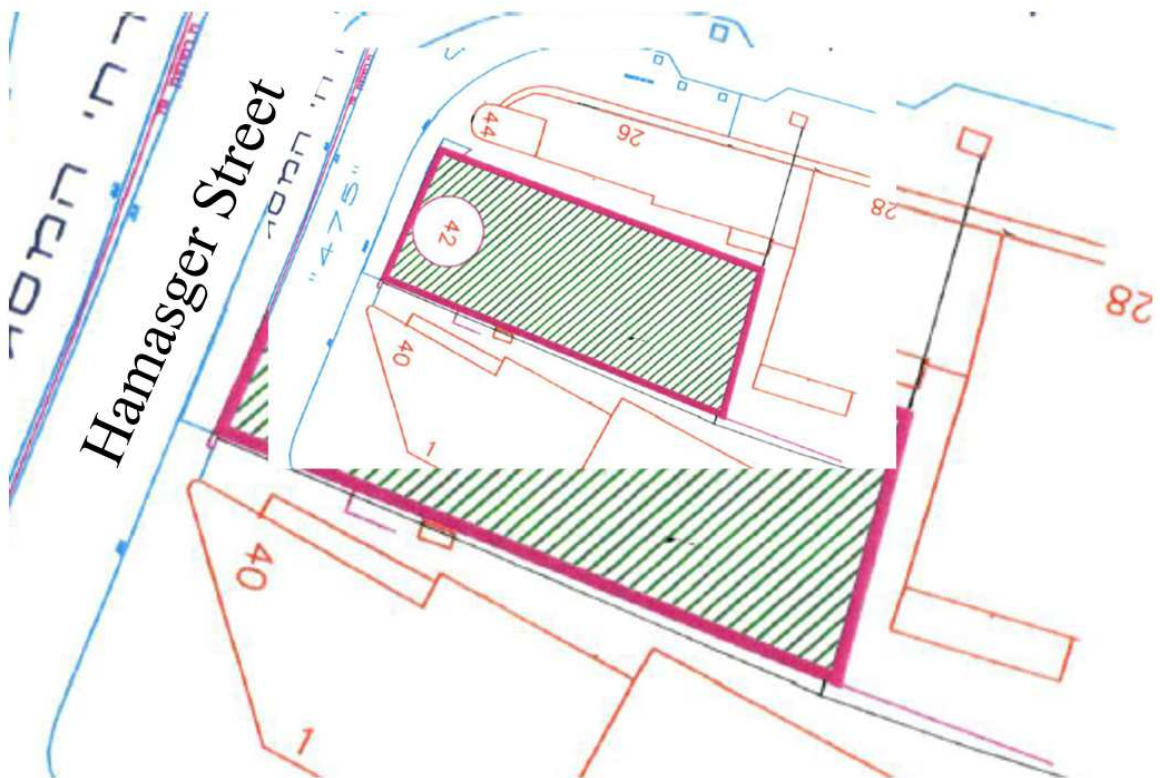


Рисунок 1. – Схема расположения здания

Соседнее здание (40) имело подвал такой же глубины, поэтому железобетонная стена подвала была запроектирована на плитных фундаментах. Фундаменты внутренних колонн и стен также плитные. Со стороны улицы Hamasger и двух соседних зданий (44, 26, 28) запроектировано шпунтовое ограждение из буронабивных железобетонных свай (рис. 2).



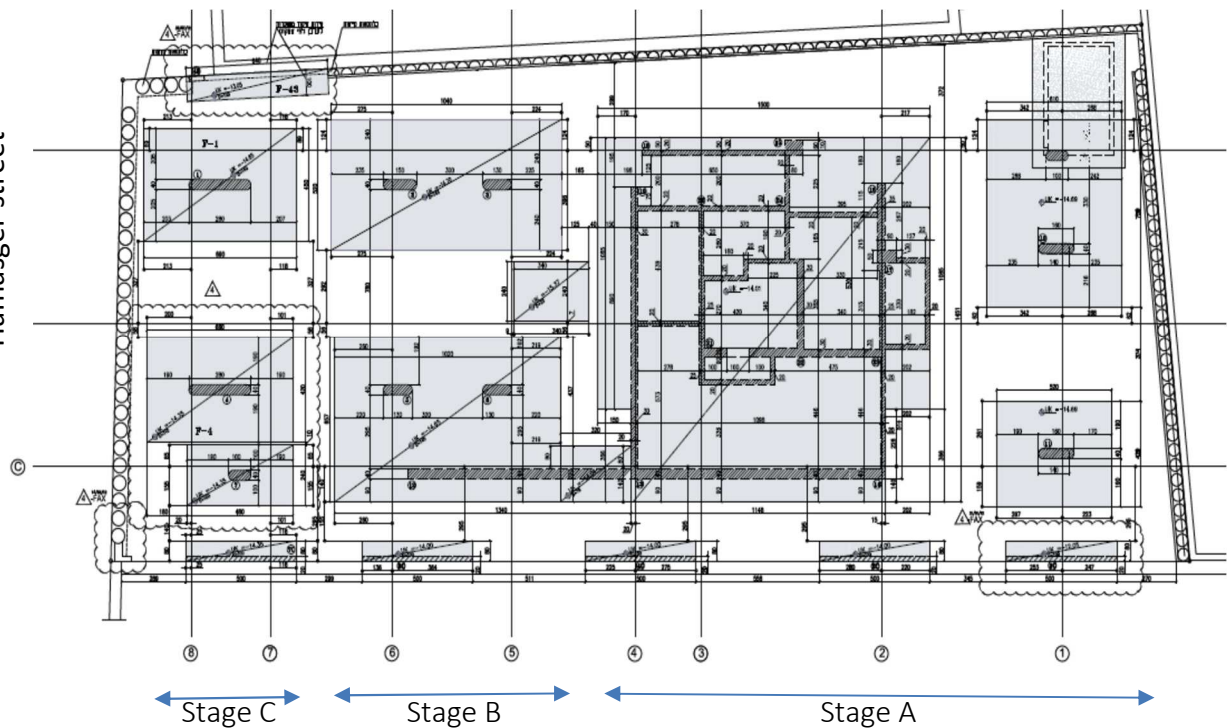


Рисунок 2. — План фундаментов здания. Отметка подошвы –14.70 м

Устройство шпунта из железобетонных свай не представляло проблем, но выполнить разработку котлована на глубину более 14 м по всей площади участка не представлялось возможным. Поэтому производство работ велось по участкам. На первой стадии строительства (Stage A) были выполнены земляные работы и возведены фундаменты под крайние колонны дворового фасада и несущие железобетонные стены центральной части здания. Параллельно с бетонными работами в подземной части здания (Stage A), велась разработка грунта под фундаменты колонн в центральной части здания (Stage B). То есть возведение монолитного 10 этажного здания с четырьмя подвальными этажами велось последовательно на трех участках. Ко времени окончания бетонирования перекрытия над подвалом в части А, на втором участке В еще не приступили к бетонированию фундаментов, а в третьей части С еще не приступили к земляным работам.

Монолитное железобетонное здание оказалось разрезанным на три части. Окончание земляных работ в части С не представлялось возможным до бетонирования ramпы, с которой можно было бы заканчивать разработку котлована и параллельно бетонировать фундаменты, колонны и перекрытия подвала в зоне С. Ramпа должна была служить мостом, опирающимся на шпунтовую наружную стену подвала, колонны и стены забетонированной части здания.

Таким образом расчетная схема и нагрузки на ramпу в стадии эксплуатации существенно отличались от расчетной схемы и нагрузок в стадии строительства. В стадии эксплуатации на балки ramпы передавались сосредоточенные нагрузки от колонн надземной части здания и равномерно распределенные собственный вес, дополнительная нагрузка от перекрытия и временная подвижная нагрузка. В стадии строительства действовала нагрузка от мобильного крана или бетононасоса с бетоновозом. Пролеты ramпы в стадии строительства были значительно больше, чем в стадии эксплуатации (рис. 3).



Подробный расчет и детальное проектирование сечений рампы с учетом всех вариантов загрузки позволил обеспечить непрерывное возведение здания в очень сложных условиях. Например, одновременно велись земляные работы, устройство фундаментов в зоне С и бетонирование монолитных колонн, балок и перекрытий надземной части здания в зонах А и В (рис. 5).



Рисунок 5. – Земляные работы в зоне С. Мобильный кран установлен на рампе. Колонна 4 забетонирована в пределах верхнего этажа подвала, для нижних этажей оставлены выпуски арматуры. На переднем плане – выпуски арматуры перекрытия

Производство железобетонных работ по участкам требует устройства вертикальных рабочих швов в несущих элементах. Изменяются расчетные схемы, нагрузки и значения внутренних усилий. Кроме того, в стадии бетонирования перекрытий на готовое перекрытие нижнего этажа опираются стойки опалубки верхнего этажа. Вся нагрузка от веса самой опалубки, бетонной смеси, рабочих, инструмента и оборудования передается на нижнее перекрытие. Сопоставление моментов в одной из балок в стадиях эксплуатации и бетонных работ представлено на рисунке 6. Превышение изгибающих моментов в стадии строительства над расчетными достигает 20%.



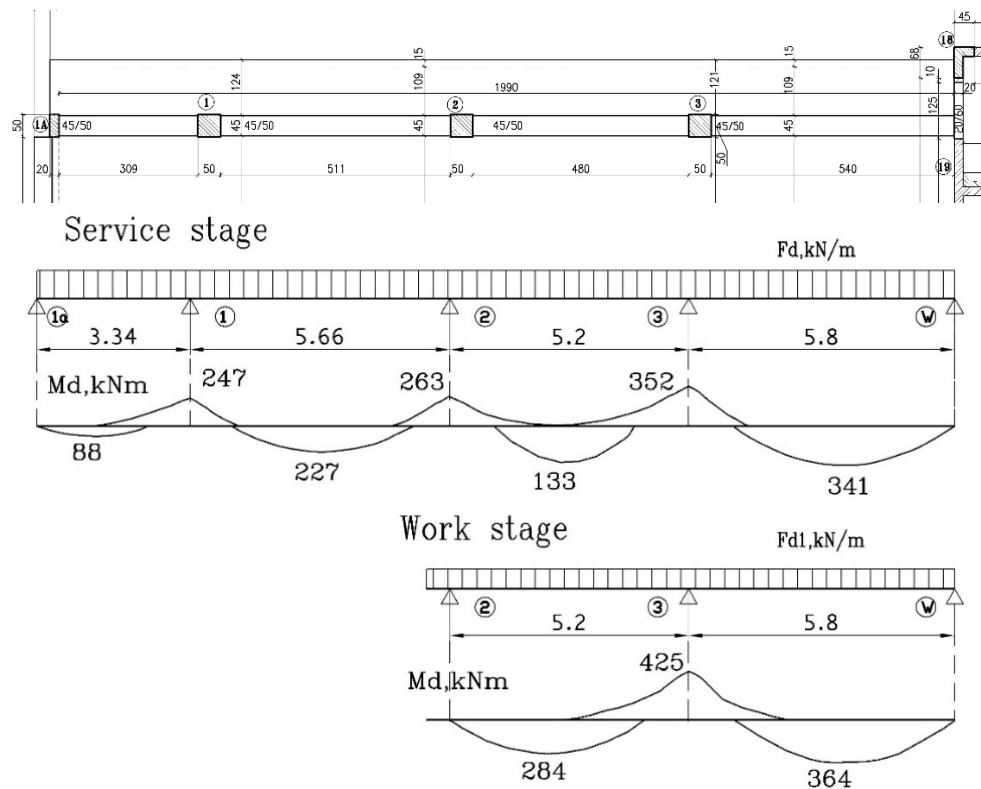


Рисунок 6. – Фрагмент плана типового перекрытия, статические схемы и эпюры моментов в балке в стадии эксплуатации и при производстве работ

Чтобы обеспечить неразрезность балки, бетонирование которой выполняется в несколько этапов, необходимо контролировать длины выпусков арматуры, достаточной для перехлеста стержней (рис. 7).



Рисунок 7. – Рабочий шов в железобетонных перекрытиях

Возведение здания в несколько этапов требует особого контроля качества, пристального внимания конструктора на каждом этапе. Возможны ошибки в размерах, в размещении арматуры, плохой очистке и подготовке бетонных поверхностей в области рабочего шва, недостаточная длина выпусков арматуры (рис. 8).



**Рисунок 8. – Недостаточная длина арматуры.  
Плохая очистка и подготовка бетонных поверхностей в области рабочего шва**

Постоянный контроль качества работ позволяет выявить брак и разработать рекомендации по его устранению. При необходимости дополнить арматурный каркас, зачистить и заделать пустоты с помощью раствора на расширяющемся цементе. Например, при обнаружении трещины в области опирания балки рампы на железобетонную стену, было предложено выполнить усиление этого узла с помощью уширения зоны опирания балки на железобетонную стену (рис. 9).



**Рисунок 9. – Трещины в области опирания балки рампы  
на железобетонную стену и деталь усиления**

#### **Выводы.**

1. Способы производства работ при возведении здания влияют на его конструктивное решение. Расчетные схемы несущих конструкций отличаются в стадиях эксплуатации и



строительства. Могут изменяться размеры пролетов изгибаемых элементов, условия опирания. Возможно бетонирование в несколько этапов, что так же влияет на расчетную схему элемента.

2. Наружки на несущие конструкции в стадии строительства отличны от расчетных нагрузок в стадии эксплуатации. Это касается в первую очередь железобетонных монолитных перекрытий. В большинстве случаев опоры опалубки верхнего этажа стоят на нижнем перекрытии. Они передают вес опалубки, бетонной смеси, рабочих и оборудования на железобетонное перекрытие нижнего этажа.

3. Эпюры внутренних усилий в железобетонных несущих элементах различны в стадиях строительства и эксплуатации. Возможны случаи, когда в стадии строительства значения расчетных моментов и поперечных сил превышают аналогичные параметры в стадии эксплуатации.

4. При расчете несущих железобетонных элементов необходимо учитывать способы возведения здания и проектировать несущие элементы, их сечения и армирование с учетом всех возможных стадий их нагружения.

5. Постоянный контроль качества производства работ конструктором позволяет выявить имеющиеся недостатки и разработать способы их устранения.

## НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.Р. Волик

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

email: a.volick@grsu.by

*Представлены результаты определения несущей способности железобетонной изгибаемой балки: по проектным данным путем проведения расчетов; по фактическим данным, полученным разрушающими и неразрушающими методами, используя графики влияния единичных показателей и экспериментальным путем. Анализ полученных результатов несущей способности показал, что для определения несущей способности возможно использование только неразрушающих методов для определения геометрических и прочностных характеристик и графиков влияния единичных показателей вместо теоретических расчетов.*

*Ключевые слова: железобетонная балка, арматура, бетон, несущая способность, неразрушающие методы, разрушение.*

## NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR EVALUATION OF BEARING CAPACITY OF BEND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

A. Volik

Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus

email: a.volick@grsu.by

*The article presents the results of determination the bearing capacity of a reinforced concrete bend beam: on the design data by performing calculations; based on actual data obtained by destructive and non-destructive methods, using graphs and indicators of the impact of individual experimentation. Analysis of the bearing capacity results showed that for the determination of the bearing capacity can only use non-destructive methods for determination of geometric and strength characteristics and graphs of influence of unit index instead of theoretical calculations.*

*Keywords: reinforced concrete beam, reinforcement, concrete, bearing capacity, non-destructive methods, destruction.*

Оценка качества железобетонных конструкций осуществляется как при изготовлении изделий и конструкций, так и при обследовании существующих зданий и сооружений [1 – 4]. При изготовлении железобетонных изделий и конструкций используют различные виды контроля – входной, операционный, приемочный и инспекционный. Операционный контроль осуществляется в ходе выполнения производственных операций и после их завершения с целью своевременного выявления дефектов и принятия мер по их устранению. При обследовании зданий и сооружений производят предварительное, общее и детальное обследование [5]. Детальное обследование выполняется с целью уточнения исходных данных, необходимых для выполнения поверочных расчетов и оценки технического состояния конструкции [6]. Как при операционном контроле, так и при детальном обследо-

вании зданий и сооружений используются разрушающие и неразрушающие методы контроля качества.

При разрушающем контроле изделий и конструкций дальнейшее их использование становится невозможным. При этом испытывают не только материалы, но и готовые конструкции: так для контроля качества серийно выпускаемых конструкций из партии обязательно отбираются образцы, предназначенные для испытания нагружением. В процессе детального обследования конструкций для определения несущей способности отбираются образцы бетона и арматуры для проведения физико-механических и физико-химических исследований в лабораторных условиях [7, 8], испытание конструкций нагружением практически не используется.

При проведении операционного контроля качества и детального обследования широко применяются неразрушающие методы контроля качества: механический (определение прочности бетона путем измерения пластической деформации или изменения упругого отскока, метод оценки местных разрушений) и физический (акустический, магнитный и электрический) методы. Каждому из методов неразрушающего контроля присуща определенная погрешность. Практика применения неразрушающих методов для определения прочности бетона показывает, что среднеквадратическая погрешность методов измерения пластической деформации и упругого отскока достигает 20 – 25%, метода оценки местных разрушений 15 – 20% и для физических методов до 25%.

Проведенные сравнительные испытания конструкций нагружением и неразрушающими методами [3, 6, 8] приводят к разным выводам о техническом состоянии конструкций. Поэтому целью данных исследований является изучение и сравнительный анализ методов контроля несущей способности железобетонной балки.

Качество железобетонных конструкций определяется целым рядом показателей, основным из которых является несущая способность, которая зависит от множества единичных показателей качества, из которых основными являются прочность бетона, геометрические характеристики сечения, прочность и площадь рабочей арматуры. Определение несущей способности при различных сочетаниях плюсовых и минусовых отклонений фактических геометрических и прочностных показателей от проектных данных необходимо рассматривать совместно, что позволяют сделать графики влияния, в которых комплексный показатель (в данном случае разрушающий момент) определяется по зависимости от единичных показателей качества.

Для построения графиков влияния прочностных и геометрических параметров на несущую способность были проведены теоретические исследования несущей способности железобетонной балки сечением 60×120 мм из бетона класса C25/30, армированной стержнями Ø10 класса S500.

Расчеты проводились по общему деформационному методу при помощи программного продукта «Beta». По результатам расчетов был построен график зависимости разрушающих моментов от прочностных и геометрических характеристик (рис. 1). Имея фактические значения единичных показателей, по графику можно определить фактическое значение разрушающего момента, причем график учитывает изменение единичных показателей качества от проектного значения и в сторону уменьшения, и в сторону увеличения.

Анализ теоретических расчетов показал, что наиболее существенно влияет на несущую способность балки изменение площади сечения арматуры: при уменьшении диаметра арматуры от проектного значения 10 мм до 6 мм несущая способность балки уменьшается на 60 %, при увеличении до 12 мм – увеличивается на 30 %, при увеличении до 20 мм несущая способность балки увеличивается на 54,5 %.

При уменьшении прочности арматуры от проектного 435 МПа до 218 МПа разрушающий момент балки снижается на 48,3 %.

Изменение прочности бетона от проектного значения 16,67 МПа до 10,67 МПа оказывает незначительное влияние на несущую способность нормальных сечений (уменьшение на 9,81%), а при уменьшении прочности до 8,0 МПа несущая способность уменьшается на 24,7%. Увеличение прочности бетона до 40% приводит к незначительному (до 5%) увеличению несущей способности.

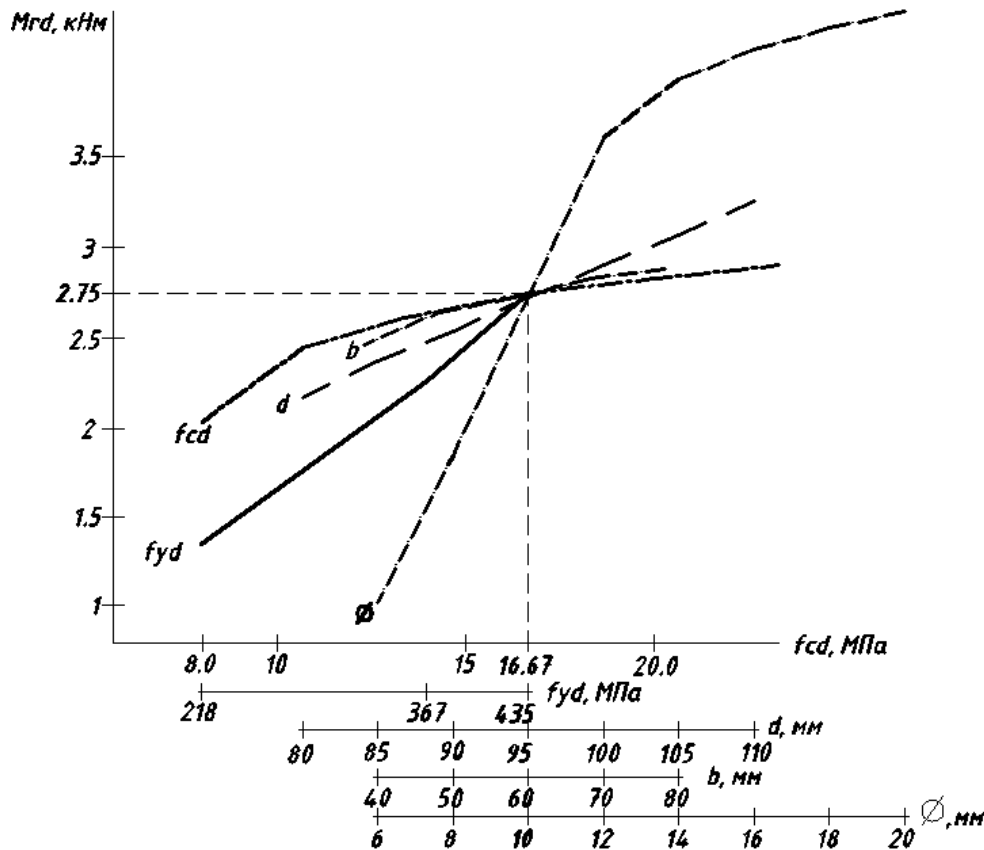


Рисунок 1. – График зависимости разрушающих моментов от прочностных и геометрических характеристик балки

При изменении рабочей высоты сечения от 80 см до 110 см при проектном значении 95 см несущая способность изменяется на 20%. При изменении ширины сечения балки от проектного значения 60 см до 50 см несущая способность балки уменьшится незначительно (на 3,6 %); а до 40 см – уменьшится до 9,81 %. При увеличении ширины балки до 80 см несущая способность балки незначительно увеличится (до 4,7 %).

Теоретические исследования позволяют сделать вывод, что максимальное влияние на несущую способность железобетонной балки оказывает изменение площади сечения и прочностные характеристики арматуры, минимальное – изменение ширины сечения балки.

Для исследования несущей способности изгибаемых элементов разрушающими методом была испытана серия опытных балок размерами 60×120×1000 мм, изготовленных на заводе КПД ОАО «Гродножилстрой» из бетона класса С25/30. Балки армированы сварными каркасами, изготовленными при помощи точечной сварки. В растянутой зоне балок расположена металлическая арматура Ø10 класса S500. Поперечная арматура Ø10 класса S240 установлена с шагом 50 мм, арматура сжатой зоны – Ø6 класса S240. Одновременно с бал-

ками из того же бетона были изготовлены контрольные кубы для определения фактических прочностных характеристик.

Испытания опытных балок производили по балочной схеме с приложением сосредоточенных усилий в третях пролета.

Теоретическое значение несущей способности железобетонной балки, определенное по проектным данным, составило  $M_{rd} = 2,75$  кНм, разрушающий момент опытных балок БО-1, БО-2 по результатам эксперимента – 3,75 кНм, что составило 136% по отношению к проектным данным. Несущая способность опытной балки БО-3 по результатам эксперимента – 4,47 кНм, что превысило проектные данные на 162%.

Фактический класс бетона экспериментальных балок по результатам испытания кубов на прессе ИП6084-1000-0 составил С27,1/33,9. Для определения прочностных характеристик бетона неразрушающими методами (ударно импульсный, пластических деформаций, ультразвуковой метод) использовались приборы ИПС-МГ4, молоток Кашкарова, УКС-МГ4 [9, 10]. Анализ результатов сопоставления прочности разрушающими и неразрушающими методами показал (рис. 2), что максимальную прочность бетона показал разрушающий метод – среднее значение прочности бетона составило 38,35 МПа. Все результаты прочности, определенные при помощи неразрушающих методов, показали значения меньше на 7 – 32 %, чем при разрушении.

Максимально приближены к значениям, полученным разрушающим методом, данные прочности бетона, определенные методом пластических деформаций, где отклонения составили 7 – 10 %. Максимальный разброс прочностных значений показал ультразвуковой метод. Максимальное отклонение (более 30 %) имеют значение прочности, полученные ударно-импульсным методом.

По результатам испытания среднее значение физического предела текучести арматурной стали, использованной для армирования экспериментальных балок, составило  $f_{ym} = 538$  МПа.

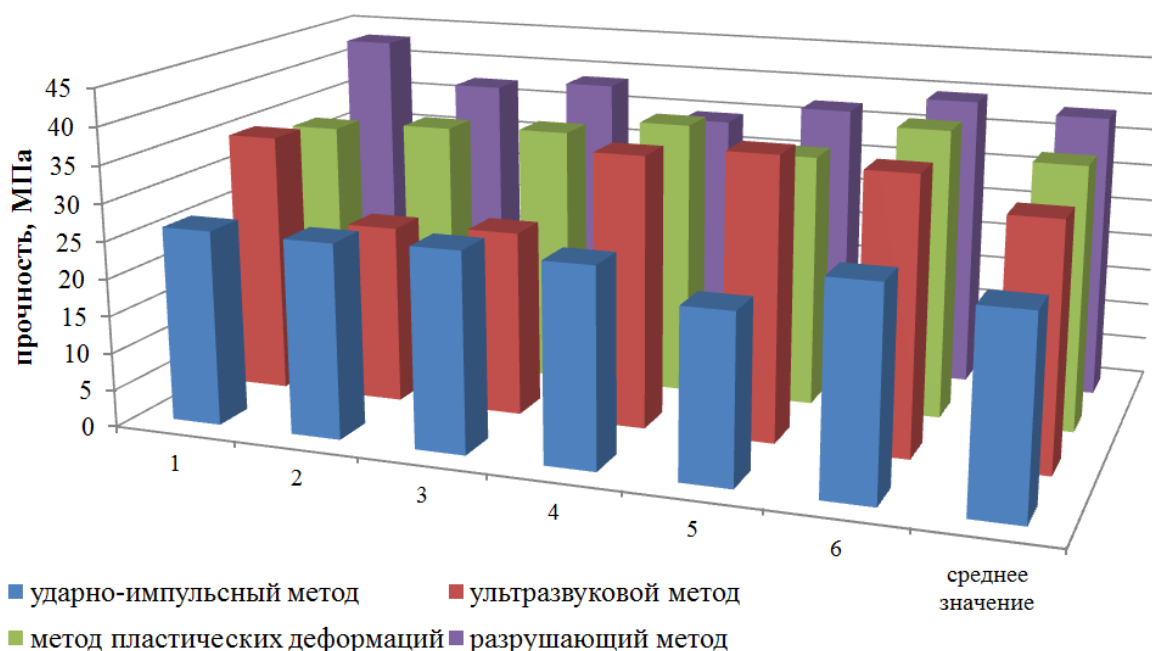


Рисунок 2. – Результаты испытаний прочности бетона разрушающими и неразрушающими методами



Анализ значений разрушающих моментов железобетонных балок (табл. 1), определенных теоретически по графикам влияния единичных показателей с использованием фактических прочностных характеристик материалов, геометрических параметров, позволяет сделать выводы, что:

- при использовании характеристик, определенных разрушающими методами, величина разрушающего момента  $M_{Rd}$  составила  $3,39 \div 3,50$  кНм, что превышает проектное значение на 25 %, но меньше экспериментальных данных на 19 %;
- при использовании характеристик, определенных неразрушающими методами, величина разрушающего момента  $M_{Rd}$  составила  $3,02 \div 3,11$  кНм, что превышает проектное значение на 11 %, но меньше экспериментальных данных на 34 %.

Таблица 1 – Величины разрушающего изгибаемого момента

Показатели	Конструкция	Величина разрушающего момента, $M_{Rd}$ , кНм
Экспериментальные данные	БО-1	3,75
	БО-2	3,75
	БО-3	4,47
Теоретическое значение, рассчитанное по проектным данным	БО	2,75
Теоретическое значение, определенные по графикам влияния по данным, полученным разрушающими методами	БО-1	3,43
	БО-2	3,51
	БО-3	3,40
Теоретическое значение, определенные по графикам влияния по данным, полученным неразрушающими методами	БО	3,11*
	БО	3,06**
	БО	3,06***
	БО	3,02****

Примечание: \* – при определении прочности бетона методом пластических деформаций; \*\* – при определении прочности бетона методом скалывания ребра; \*\*\* – при определении прочности бетона ультразвуковым; \*\*\*\* – при определении прочности бетона ударно-импульсным методом

**Вывод.** Проведённые теоретические и экспериментальные исследования показали, что для определения несущей способности железобетонной балки возможно использование фактических данных прочностных характеристик материалов и геометрических характеристик балок, определенных неразрушающими методами, и графиков влияния единичных показателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бербеков, Ж.В. Неразрушающие методы контроля прочности бетона / Ж.В. Бербеков // Молодой ученый. – 2012. – № 11. – С. 20–23.
- Джонс, Р. Неразрушающие методы испытаний бетонов / Р. Джонс, И. Фэкзоару. – М. : Стройиздат, 1974. – 292 с.
- Золотухин, Ю.Д. Испытание строительных конструкций / Ю.Д. Золотухин. – М. : Стройиздат, 1983. – 210 с.
- Каневский, И.Н. Неразрушающие методы контроля : учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.

5. Лазовский, Д.Н. Проектирование реконструкции зданий и сооружений : учеб.-метод. комплекс : в 3 ч. / Д.Н. Лазовский. – Новополюк : ПГУ, 2008. – Ч. 2 : Оценка состояния и усиление строительных конструкций. – 336 с.
6. Обследование и испытание зданий и сооружений / О.В. Лужин [и др.] – М. : Стройиздат, 1987. – 264 с.
7. Улыбин, А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений / А. В. Улыбин // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4. – С. 10–15.
8. Штенгель, В.Г. О корректном применении неразрушающего контроля в обследованиях железобетонных конструкций длительно эксплуатирующихся сооружений / В.Г. Штенгель // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 3. – С. 56–62.
9. Бетоны. Правила контроля прочности бетона : ГОСТ 18105-86. – Введен 1987-01-01 впервые. – М. : Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и оценке соответствия в строительстве (МНТКС), 2007. – 15 с.
10. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов : ГОСТ 18353-79.. – Введен 1980-06-30 впервые.– М. : МНТКС, 2015. – 40 с.

# МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБУ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ГИБРИДНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

А.И. Гиль, Е.Д. Лазовский

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.hil@psu.by

*Рассмотрен вариант применения композитной арматуры совместно с металлической (гибридное армирование) в изгибаемых статически неопределяемых железобетонных элементах. Показаны преимущества, недостатки и перспективы применения данного вида армирования. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, показаны характеристики и конструкции опытных образцов, схема установки приборов при испытании. Представлена последовательность проведения испытания.*

*Ключевые слова: композитная арматура, гибридное армирование, испытательная установка, экспериментальные исследования, неразрезная балка.*

## THE METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL STUDIES OF RESISTANCE TO BENDING OF STATICALLY INDETERMINATE REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH HYBRID REINFORCEMENT

A. Hil, Y. Lazouski

Polotsk State University, Belarus

email: a.hil@psu.by

*In this paper, the application of composite reinforcement together with metallic (hybrid reinforcement) in bent statically undetectable reinforced concrete elements is considered. The advantages, disadvantages and prospects of using this type of reinforcement are shown. A technique for carrying out experimental studies has been developed; the characteristics and designs of experimental samples, the scheme of installation of instruments during testing are shown. The sequence of the test is presented.*

*Keywords: composite reinforcement, hybrid reinforcement, test installation, experimental studies, continuous beam.*

В настоящее время все большее применение в строительстве находит неметаллическая композитная арматура, которую в международной практике принято обозначать FRP – *fiber reinforced polymer composite* [1–3]. Такая арматура находит широкое применение при возведении железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, конструкций специального назначения. Следует отметить, что широкое внедрение такого вида армирования затруднено в связи с отсутствием единых требований государственных либо международных стандартов к механическим свойствам и формам поверхности композитных стержней, методам расчета конструктивных элементов, армированных композитной арматурой, единых требований к методам контроля качества и правил приемки стержней. Кроме того, существенную роль в ограничении возможности применения композитной ар-

матуры (из стеклянных, базальтовых и арамидных волокон) играет ряд отрицательных свойств композита: низкая огнестойкость, низкий модуль упругости, а также низкая щелочестойкость, от которой будет зависеть долговечность проектируемых конструкций.

В последнее время все больше внимания уделяется вопросу расширения области применения композитных стержней в изгибаемых железобетонных элементах, не требующих дополнительных затрат на устранение основных недостатков композита. К настоящему времени даже высокая прочность при растяжении (более 1000 МПа), не позволяет решить главных, на данный момент, проблем применения композитной арматуры в качестве рабочей (при полной замене стальной) в железобетонных конструкциях, а именно низкого значения модуля упругости (порядка 50 ГПа) и отсутствия надежных анкерных элементов. Исследования в этой области [4–6] показали, что, железобетонный изгибаемый элемент, армированный исключительно композитной арматурой, после образования нормальных трещин работает линейно-упруго и разрушение такого типа элементов происходит по бетону. Таким образом, применение композитной арматуры в изгибаемых элементах без предварительного напряжения на сегодняшний день нецелесообразно. Стоит обратить внимание на тот факт, что предварительное напряжение неметаллической арматуры вызывает большие технологические трудности: начиная от способа натяжения и заканчивая разработкой надежных анкеров. Кроме того, практически отсутствуют методики расчета трещиностойкости и потерь преднапряжения для данного вида армирования.

Ситуация может быть значительно улучшена при использовании в растянутой зоне железобетонного элемента совместно композитной и металлической арматуры (так называемое гибридное, либо комбинированное армирование). Экспериментальные исследования статически определимых балок с комбинированным армированием [7] позволили получить пластическую форму разрушения элемента. Кроме того, авторами отмечено, что ветвь пластического деформирования элемента с комбинированным армированием (даже с минимальным количеством композитной арматуры) на графике зависимости «изгибающий момент – прогиб», оказалась существенно протяжённей, нежели у элементов, армированных исключительно металлической арматурой. Анализ результатов проведенных испытаний [7] дает возможность предположить, что даже небольшое количество композитной арматуры, работающей в упругой стадии деформирования, может оказать положительный эффект в работе статически неопределимых балок. Этот эффект может быть достигнут с точки зрения более рационального перераспределения усилий. Предполагаемый благоприятный результат от применения гибридного армирования позволит в перспективе расширить область применения композитной арматуры без предварительного напряжения.

Для проверки эффективности применения гибридного армирования в неразрезных балках планируется произвести следующие экспериментальные исследования. Исследования будут проведены на опытных образцах в виде двухпролетных балок прямоугольного поперечного сечения 120 мм (b) x 190 мм (h) длиной 4000 мм, пролетом 1800 мм. В качестве варьируемого параметра выбрано количество металлической и композитной арматуры в опорном сечении. Программа исследований составлена таким образом, чтобы принятое суммарное количество арматуры опорной зоны, оценивалось механическим индексом

армирования  $\omega$  ( $\omega = \frac{f_{yk} \cdot \rho_{st} + f_{pk} \cdot \rho_p}{f_{cm}}$ ,  $f_{cm} = 25$  МПа), обеспечивающим достижение пример-

но равного значения предельного изгибающего момента при прогнозируемом разрушении балок по нормальным сечениям (по растянутой зоне). Были изготовлены 4 опытных образца

неразрезных двухпролетных балок с гибридным армированием опорной зоны, а также два эталонных образца с полностью металлической и композитной арматурой в опорных сечениях соответственно. Характеристика опытных образцов приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика опытных образцов

Обозначения балок	Размеры поперечного сечения, мм	Армирование опорной зоны	Площадь, мм <sup>2</sup>		Коэффициент армирования, %		$\omega$
			$A_{st}$	$A_p$	$\rho_{st}$	$\rho_p$	
БЭ1	120x190	2d12 S500	226	-	0,99	-	19,8
БЭ2		2d10 FRP1300	-	133,34	-	0,58	28,9
Б3		2d10 S500, d8FRP1300	157	40	0,69	0,175	21,29
Б4		2d8 S500, d10FRP1300	101	66,67	0,44	0,29	23,25
Б5		2d6 S500, d12FRP1300	57	94,34	0,25	0,41	25,73
Б6		2d6 S500, 2d10FRP1300	57	133,34	0,25	0,58	33,9

Армирование образцов осуществлялось пространственными вязанными каркасами. Выбор вязанных каркасов обуславливался влиянием на сопротивление изгибу таких факторов, как ослабление сечения арматуры при ее сварке, влияние приваренных поперечных стержней на сцепление продольной арматуры с бетоном. Шаг поперечных стержней выбирался таким образом, чтобы не допустить разрушение образцов балок по наклонным сечениям от среза.

Для продольного армирования нижней зоны опытных образцов использовалась стержневая арматура периодического профиля диаметром 12 мм класса S500 (выбор одинакового количества арматуры в опорном и пролетном сечении обусловлен необходимостью получения перераспределения усилий за счет деформирования арматуры опорной зоны, т.е. ослабления опорного сечения); для поперечного армирования – вязанные замкнутые хомуты из арматурной стали класса S500 диаметром 6мм. Для продольного армирования верхней зоны образцов балок применялось гибридное армирование, в качестве стальной арматуры используются стержни периодического профиля диаметром 6, 8, 10 и 12 мм класса S500, в качестве композитного армирования стержневая стеклопластиковая арматура периодического профиля диаметром 8, 10 и 12 мм, производства ЧТУП «Минпласт» прочностью при растяжении не ниже  $f_{pk} = 1000$  МПа. Конструкция образцов балок и схема армирования показана на рисунке 1, спецификация арматурных изделий представлена в таблице 2.

С целью определения физико-механических характеристик продольной и поперечной арматуры опытных образцов-балок были отобраны отрезки арматуры из тех же партий, которые использовались для изготовления арматурных каркасов. Испытания по определению физико-механических характеристик стеклопластиковой арматуры проводились согласно ГОСТ 32492-2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик» на отрезках стержней, отобранных из тех же партий, которые использовались при изготовлении каркасов.



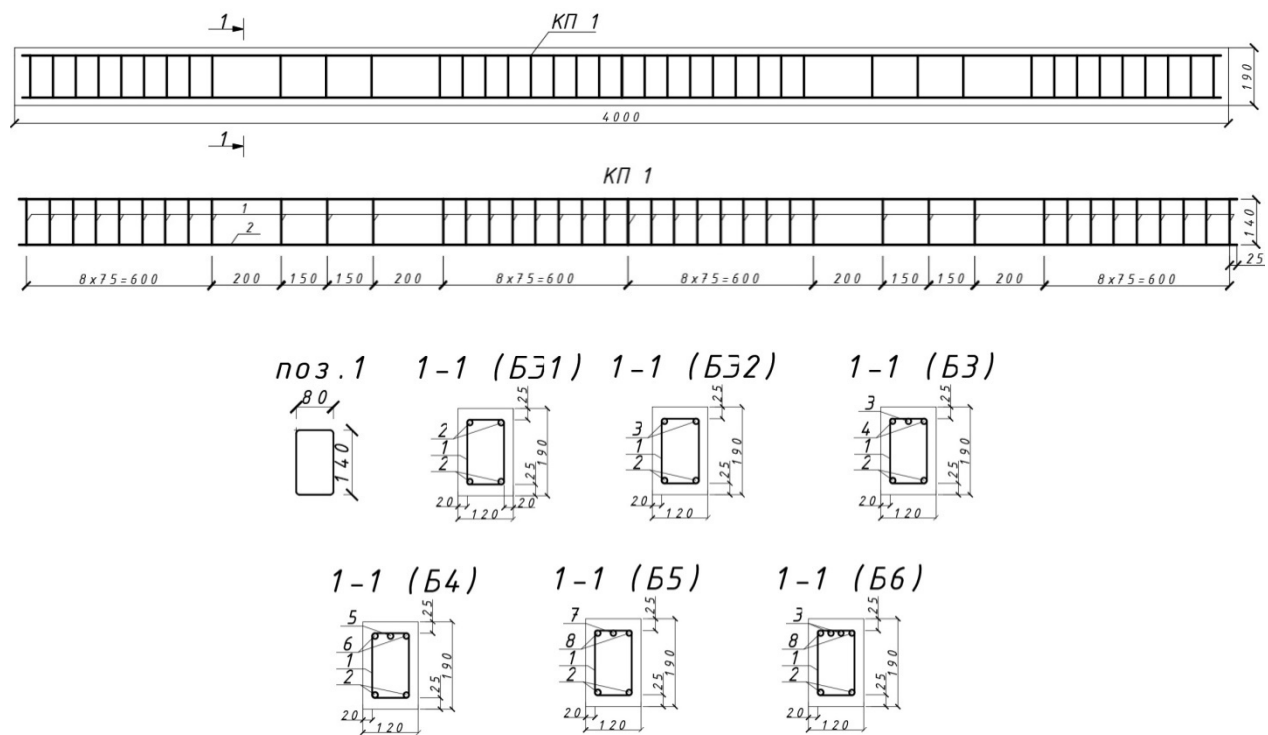


Рисунок 1. – Конструкция образцов и схема армирования образцов-балок

Таблица 2 – Спецификация арматурных изделий

Поз.	Наименование	Кол-во, шт.	Поз.	Наименование	Кол-во, шт.
КП1 БЭ1			КП1 Б5		
1	Ø6 S500 L=500	41	1	Ø6 S500 L=500	41
2	Ø12 S500 L=3950	4	2	Ø12 S500 L=3950	2
КП1 БЭ2			7	Ø12 FRP L=3950	1
1	Ø6 S500 L=500	41	8	Ø6 S500 L=3950	2
2	Ø12 S500 L=3950	2	КП1 Б6		
3	Ø10 FRP L=3950	2	1	Ø6 S500 L=500	41
КП1 Б3			2	Ø12 S500 L=3950	2
1	Ø6 S500 L=500	41	3	Ø10 FRP L=3950	2
2	Ø12 S500 L=3950	2	8	Ø6 S500 L=3950	2
4	Ø8S500 L=3950	2			
3	Ø10 FRP L=3950	1			
КП1 Б4					
1	Ø6 S500 L=500	41			
2	Ø12 S500 L=3950	2			
5	Ø8FRP L=3950	1			
6	Ø10S500 L=3950	2			

Балки будут испытаны как двухпролетные неразрезные, загруженные четырьмя сосредоточенными силами, расположенными симметрично относительно средней опоры на расстоянии 600 мм и 1200 мм соответственно. Загрузка балок будет осуществляться с помощью гидравлического домкрата, подключенного к ручной насосной станции. Нагрузка от домкрата на каждый пролет балки будет передаваться через распределительную траверсу, выполненную из прокатных швеллеров. Испытания образцов балок будут проведены согласно ГОСТ 8829-94.

Для раскрытия статической неопределимости в качестве опор будут использованы образцовые динамометры ДОСМ 3-5. Для измерения угла поворота опорного поперечного сечения относительно вертикальной оси на боковой поверхности грани балки будет жестко закреплена металлическая планка с установленными на ее концах индикаторами часового типа, при помощи которых будут измеряться перемещения концов планки по горизонтали. Для дополнительного определения угла поворота будут использованы электрические инклинометры, установленные на верхней грани балки. Прогибы будут определяться при помощи прогибомеров БПАО, установленных в пролете и на опорах (для учета влияния осадки опор). Для определения ширины раскрытия трещин будут использованы микроскопы с ценой деления 0,05мм. Для определения деформаций по высоте опорного сечения будет использована система комплексного мониторинга «Терем-4». Нулевые показания приборов будут сниматься до начала испытаний с учетом собственного веса конструкции. Схема расстановки приборов приведена на рисунке 2.

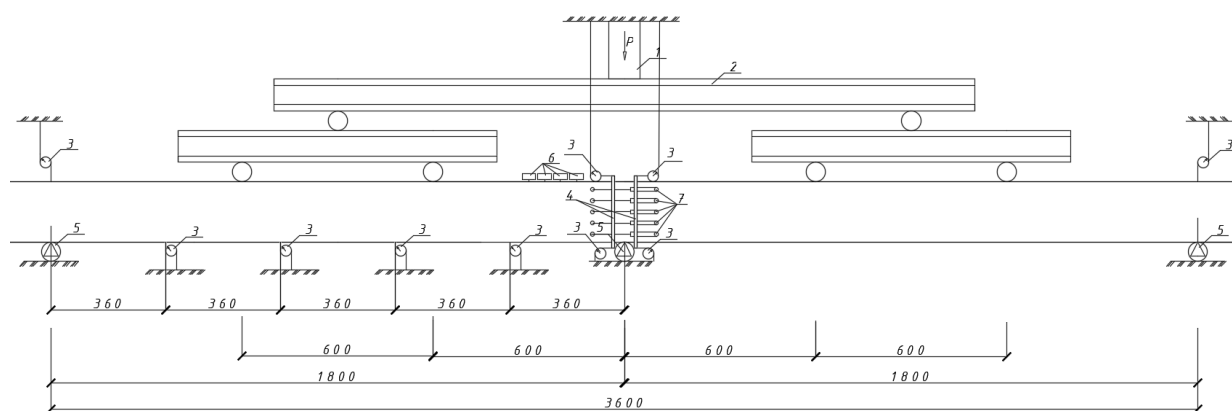


Рисунок 2 – Схема расстановки приборов на опытной балке:

- 1 – гидравлический домкрат; 2 – распределительная траверса; 3 – прогибомер;  
3' – индикаторы часового типа; 4 – металлическая планка; 5 – образцовый динамометр;  
6 – электронный инклинометр; 7 – система мониторинга «Терем-4»

Для получения новых экспериментальных данных о характере работы изгибаемых статически неопределимых железобетонных балок с гибридным армированием, а также для подтверждения предполагаемой методики расчета, была разработана методика проведения экспериментальных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *fib* 2005 "FRP Reinforcement for reinforced concrete structures", Task Group 9.3 (Fiber-Reinforced Polymer) Reinforcement for Concrete Structures, Lausanne, Switzerland, 2005. – 173 p.
2. ACI 440.1R-03 : Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. – American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA – 2003 – 81 p.
3. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bars – CNR-DT 203/206, Rome, June 2007 – 35 p.
4. Мясников, А.Л. Изгибаемые конструкции со стеклопластиковой арматурой // А.Л. Мясников, Е.П. Телешман, А.А. Варламов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : материалы 72-й международной научно-технической кон-

ференции / под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – Т. 2. – С. 70–74.

5. Польской, П.П. О влиянии стеклопластиковой арматуры на прочность нормальных сечений изгибаемых элементов из тяжёлого бетона [Электронный ресурс] // П.П. Польской, Мерват Хишмах, Михуб Ахмад // Электр. журн. «Инженерный вестник дона». – 2012. – № 4.

6. Маилян, Д.Р. Влияние стального и композитного армирования на ширину раскрытия нормальных трещин [Электронный ресурс] / П.П. Польской, Д.Р. Маилян. – CYBERLENINKA. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-stalnogo-i-kompozitnogo-armirovaniya-na-shirinu-raskrytiya-normalnyh-treschin>. – Дата доступа: 24.03.2015.

7. Тур, В.В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями / В.В. Тур, В.В. Малыха // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 58–65.

## АВАРИЙНЫЕ СЛУЧАИ ПРИМЕНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ АНКЕРОВ

К.А. Кучукбаева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия  
email: graceful\_night@mail.ru

*Выполнен анализ ошибок аварийных ситуаций при устройстве котлованов. Выявлены основные причины их возникновения. Подчеркивается важность инженерно-геологического строения и гидрогеологических условий территории при разработке котлована. Также выявлены опасности, связанные с анкерным креплением ограждения котлована, и приведено несколько аварийных ситуаций, связанных с данными опасностями. Помимо того предложены рекомендации по снижению аварийных ситуаций, возникающих при строительстве котлована.*

*Ключевые слова: авария, котлован, грунтовые анкеры, инженерно-геологические изыскания.*

## THE EMERGENCY CASES OF APPLICATION OF GROUND ANCHORS

K. Kuchukbaeva

Perm National Research Polytechnic University, Russia  
email: graceful\_night@mail.ru

*In this article the error analysis of contingency situations at the device of ditches is made. The main reasons for their emergence are established. Importance engineering and geological structure and hydrogeological conditions of the territory is emphasized when developing a ditch. The dangers bound to anchor fastening of a protection of a ditch are also revealed, and several contingency situations, the bound to these dangers are given. Also recommendations about decrease in the contingency situations arising at construction of a ditch are offered.*

*Keywords: accident, ditch, ground anchors, engineering and geological survey.*

На сегодняшний день наблюдается стремительное развитие строительной отрасли, а устройство глубоких котлованов все больше принимает массовый характер. Это связано с потребностями в развитии транспортной инфраструктуры, инженерных систем и обеспечения местами парковки личного транспорта ввиду малого количества свободных земель городских территорий. И теперь при увеличивающейся интенсивности освоения подземного пространства все чаще возникают различные аварийные ситуации, происходящие при устройстве котлованов.

Под аварией при строительстве обычно понимают серьезное повреждение или разрушение строящегося сооружения или его части, конструкций рядом расположенных зданий и коммуникаций. Восстановление сценариев развития аварий, выявление наиболее часто повторяемых ошибок и просчетов при проектировании и строительстве, а также исследование факторов и воздействий, не учитываемых нормативными документами, играют весьма важную роль в предотвращении новых аварийных ситуаций при устройстве котлованов [1].

Для принятия правильного проектного решения необходимо иметь максимально полную и достоверную информацию об участке строительства и его непосредственном окружении. Но практика показывает, что заказчик стремится к экономии средств на этапе

выполнения проектно-изыскательских работ, что приводит к дополнительным затратам на проектирование, ликвидацию последствий аварий и работы по новому проекту. А материальный ущерб, наносимый серьезной аварией в котловане, оценивается многими миллионами долларов.

Проанализировав материалы по обзору аварий, возникающих при устройстве котлованов, таких авторов, как И.В. Кобылин [1] и В.А. Еремин [2], можем сказать, что основными причинами аварий являются:

- ошибки и просчеты при выполнении инженерно-геологических и других видов изысканий;
- ошибки при проектировании, которые могут допускать как геотехники, анализирующие взаимодействие конструкций с грунтовым массивом, так и конструкторы, определяющие параметры конструктивных элементов;
- некачественное выполнение работ, не соблюдение при строительстве проектных параметров, использование материалов и технологий, не соответствующих проекту;
- нарушения проекта организации строительства (ПОС), несоблюдение предусмотренной проектом последовательности производства работ;
- ошибки в управлении проектом, отсутствие надлежащего контроля качества, недостаточный мониторинг, плохое взаимодействие с проектировщиком в процессе строительства, несоблюдение сроков строительства;
- неправильная эксплуатация;
- форс-мажорные причины.

Устройство анкерного крепления ограждений котлованов в стесненных городских условиях может быть связано со многими опасностями. Основной проблемой является то, что корни анкеров могут располагаться за пределами участка застройки в иных грунтовых условиях, чем предполагал проектировщик. Поэтому необходимо проводить исследования грунтов за пределами строительной площадки, однако убедить заказчика согласовать программу изысканий вне строительной площадки практически невозможно, что в дальнейшем и приводит к аварийным ситуациям.

Примером может служить ситуация, произошедшая в г. Москва. В 2005 г. были выполнены инженерно-геологические изыскания под строительство жилого комплекса, имеющего двухэтажную подземную часть, на ул. Дмитрия Ульянова [3]. Результат данных работ показал, что инженерно-геологические условия участка строительства не являются простыми для проектирования, строительства и дальнейшей эксплуатации здания. В соответствии с проектом ограждение котлована должно было закрепляться двумя ярусами грунтовых анкеров. В процессе строительства подземной части выяснилось, что с одной стороны вне контура котлована залегают текучие суглинки, не встреченные при изысканиях, следовательно, требуемую проектную несущую способность грунтовых анкеров обеспечить не удалось. В результате было принято решение скорректировать проект, и взамен анкеров на проблемном участке были установлены распорки, которые затрудняют производство работ в котловане.

Существуют и другие опасности, связанные с применением в качестве ограждения котлована грунтовых анкеров. Не достаточно хорошо опрессованные головки анкеров способны являться источниками фильтрации подземных вод сквозь стену в грунте. Потеря преднапряжения в анкерах может происходить также и в силу влияния других подземных работ, проводимых поблизости. Устройство анкеров под фундаментами рядом расположенных зданий может вызывать их дополнительные осадки.

Все вышеперечисленные опасности хорошо известны, и специалисты обычно считают с ними в процессе проектирования. Однако известны случаи, когда ограждения котлованов с анкерным креплением получают весьма значительные перемещения при отсут-



ствии снижения усилий в анкерах. В особенности это явление характерно для ограждений, имеющих многоярусное крепление и значительную глубину погружения, а также для котлованов с большими размерами в плане.

Например, при устройстве шпунтового ограждения котлована с пятью ярусами анкеров в Бостоне были зафиксированы горизонтальные перемещения стены до 160 мм. В процессе устройства котлована с анкерным креплением в Барселоне перемещение верха стены в грунте достигло 190 мм, в результате чего были установлены дополнительные анкеры. Подобные величины горизонтальных смещений ограждений котлованов могут представлять серьезную угрозу для безопасности эксплуатации окружающей застройки и коммуникаций.

Следующий пример: случай обрушения участка шпунтовой подпорной стенки с многоярусным анкерным креплением при строительстве станции метро в бразильском городе Сан-Паулу, которое было вызвано протечками коммуникаций. Авария произошла в момент, когда глубина котлована составила приблизительно 12 м. Два верхних яруса анкерного крепления были выполнены, анкера третьего яруса оставались еще не натянутыми. Основной причиной потери устойчивости ограждения на локальном участке были признаны протечки из водопровода, расположенного в 30 м. Протечки не были своевременно обнаружены и локализованы, так как первичной базой дренажа являлась большая подземная камера рядом с котлованом. Фильтрация техногенных вод из камеры в котлован в значительной степени увеличила давление на ограждение котлована и привела к снижению сопротивления пассивного отпора грунта [1].

Таким образом, аварии, случающиеся при устройстве котлованов в городских условиях, несут тяжелые социальные и экономические последствия. Примерно половина всех аварий во время работ по устройству котлованов объясняется низким качеством работ или отступлением от проекта в процессе строительства. Залогом успеха в выполнении работ является исследование инженерно-геологического строения и гидрогеологических условий территории. Важным требованием к инженерно-геологическим изысканиям при устройстве глубоких котлованов является необходимость исследования грунтового массива вне строительной площадки, особенно это касается грунтовых анкеров. Также при разработке программы изысканий на площадках необходимо изучение архивных материалов. А для глубоких котлованов весьма важным является наблюдение за величинами усилий в анкерах, температурными деформациями и уровнем грунтовых вод.

Для уменьшения аварийных случаев при строительстве котлованов необходим комплексный подход к обеспечению безопасности строительства. Исключить многие аварии помогает геотехнический мониторинг, если он хорошо организован и проводится с достаточной регулярностью. При этом активную роль должно играть интерактивное проектирование, дающее возможность вносить требуемые изменения в проект.

Однако произошедшие аварии необходимо изучать для того, чтобы подобных ошибок в будущем не произошло. Для этого их необходимо освещать в различной технической документации и обсуждениях, чего не происходит в настоящее время. Это и будет основой для совершенствования нормативной базы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Колыбин, И.В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях / И.В. Колыбин // Развитие городов и геотехническое строительство : сб. тр. междунар. конф. по геотехнике. – 2008. – № 12. – С. 89–124.
2. Еремин В.Я. Крепление бортов глубоких котлованов [Электронный ресурс] / В.Я. Еремин. – Режим доступа: <https://blogostroy.ru/2011/10/06/крепление-бортов-котлованов/>. – Дата доступа: 22.01.2018.
3. Ракитина, Н.Н. Достоверность и достаточность инженерных изысканий для строительства: правило двух Д / Н.Н. Ракитина, А.Д. Потапов // Вестник МГСУ. – 2014. – № 1. – С. 90–97.

## КОНСТРУКЦИОННЫЙ БЕТОН МОРСКИХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ: ДЕГРАДАЦИОННЫЙ И ВНЕЗАПНЫЙ ОТКАЗ

<sup>1</sup>В.В. Малюк, <sup>2</sup>С.Н. Леонович, <sup>2</sup>Н.А. Будревич

<sup>1</sup>ООО «Трансстрой-Тест», Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

email: mw.77@mail.ru, snleonovich@yandex.ru, nellibudrevich@yandex.by

*Рассмотрен опыт строительства морских гидротехнических сооружений в тяжелых гидрометеорологических условиях эксплуатации. Проанализированы характерные разрушения бетона в зоне переменного уровня после первого зимнего сезона. Установлены причины разрушения бетона в виде явного внезапного отказа. Предложена схема формирования структуры бетона при морозных и солевых воздействиях в зависимости от зрелости структуры бетона. Намечены направления дальнейших исследований в области прогнозирования долговечности конструкций из бетона и железобетона для морских гидротехнических сооружений.*

*Ключевые слова: бетон, деградация, отказ, морские гидротехнические сооружения.*

## CONSTRUCTION CONCRETE OF MARINE HYDROTECHNICAL STRUCTURES: DEGRADATION AND FLASHOUT

<sup>1</sup>B. Malyuk, <sup>2</sup>S. Leonovich, <sup>2</sup>N. Budrevich

<sup>1</sup>Transstroy-Test, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk

email: mw.77@mail.ru, snleonovich@yandex.ru, nellibudrevich@yandex.by

*The experience of construction of marine hydraulic structures in heavy meteorological conditions of operation is considered. Characteristic destruction of concrete in the zone of a variable level after the first winter season has been analyzed. The reasons for the destruction of concrete in the form of a sudden sudden failure are established. A scheme is proposed for the formation of the concrete structure under frost and salt effects, depending on the maturity of the concrete structure. The directions of further research in the field of forecasting the durability of concrete and reinforced concrete structures for marine hydraulic structures are outlined.*

*Keywords: concrete, degradation, failure, marine hydraulic structures*

Несмотря на большое число выполненных исследований по созданию стойкого бетона для морских сооружений, вопрос стойкости бетона и железобетона в тяжелых гидрометеорологических условиях эксплуатации остается актуальным и в настоящее время. Исследователи отмечают [1, 8, 9, 14, 17, 18] – сегодня нет проблем в деле изготовления долговечного бетона даже для весьма агрессивных и коррозионных сред. Проблема заключается в создании надежных и долговечных конструкций. Это означает, что явно недостаточно существующих методов расчета, конструирования и организационно-технологических мер по обеспечению стойкости бетона, поскольку практически невозможно учесть расчетным путем влияние всех факторов ее определяющих. Поэтому за последние годы появились новые исследования в области создания моделей долговечности для прогноза срока службы конструкций и сооружений [7, 11]. Важное место в решении данной проблемы отводится созданию практической модели поведения конструкции во времени на основе

проведения мониторинга в процессе эксплуатации конструкции с учетом всех её фактических характеристик. Поэтому дальнейшее накопление экспериментальных данных о поведении конструкций в агрессивных и суровых условиях, позволяющих адекватно оценивать деградацию бетона в конструкциях, является весьма актуальной задачей. Следует отметить, что на Дальнем Востоке систематические натурные и лабораторные исследования стойкости бетона морских гидротехнических сооружений проводятся с 1970 г. по настоящее время. В период с 1970 по 1990 гг. эти исследования проводились в Сахалинской научно-исследовательской лаборатории ВНИИ транспортного строительства (ЦНИИС), а затем, после реорганизации лаборатории, исследования в данном направлении ведутся в компании «Трансстрой-Тест» [12, 13]. В данной работе приведены результаты исследований стойкости бетона на основе опыта строительства морских сооружений на Дальнем Востоке за последние 15 лет, в которых принимали участия сотрудники компании «Трансстрой-Тест».

В процессе строительства морских причальных и оградительных сооружений из бетона и железобетона достаточно часто строители сталкиваются с проблемой разрушения новых конструкций в зоне переменного уровня после первого зимнего сезона, т.е. через 3...4 месяца эксплуатации. Разрушение такого вида нельзя характеризовать как деградацию [3] или деградационный отказ [4] бетона, поскольку под этим понимается постепенное понижение уровня эксплуатационных характеристик материалов. В соответствии с общетехнической терминологией [4] данный вид разрушения классифицируется как явный внезапный отказ – скачкообразный переход объекта в неработоспособное состояние, обнаруживаемое визуально при подготовке объекта к применению или в процессе его применения.

В данной статье приводится анализ характерных случаев разрушения бетона при строительстве морских гидротехнических сооружений на Дальнем Востоке за период с 2003 по 2010 гг. Например, при строительстве берегозащитного участка корневой части причала МОФ на заводе сжиженного природного газа (СПГ) в п. Пригородное (о. Сахалин) из фасонных блоков-гексабитов (далее- блоков), наблюдали разрушение бетона в отдельных блоках, расположенных в зоне переменного уровня, после первого зимнего сезона. (рисунок 1).



Рисунок 1. – А – общий вид берегозащитного сооружения корневой части причала МОФ (п. Пригородное, завод СПГ, о. Сахалин) в зимний период; Б – характер разрушения бетонных блоков (гексабитов) после первого зимнего сезона

Отличительной особенностью морских берегозащитных сооружений, эксплуатируемых на о. Сахалин, является то, что при установлении отрицательных температур воздуха

происходит постепенное нарастание слоя морского льда на поверхности бетона (рис. 1-А). Изделия вмерзает в морской лед в зоне переменного уровня и в таком состоянии находятся в течение 3...4 месяцев. Данные условия эксплуатации, безусловно, отличаются от обычных приливно-отливных воздействий на бетон вертикальных причальных стенок в зоне переменного уровня. Эта особенность условий эксплуатации блоков, вмерзших в морской лед, проявилась марте 2004 года после таяния льда. На отдельных блоках наблюдали разрушение поверхностного слоя бетона на глубину до 4 см (рис. 1-Б). Блоки изготавливали в заводских условиях с применением пропаривания по мягкому режиму. Специалисты компании «Трансстрой-Тест» на основании анализа всех технологических переделов изготовления изделий установили следующее. На заводе осуществляли контроль качества на всех технологических переделах, поэтому исключалась вероятность выпуска бетонной смеси с показателями качества, не соответствующих проектным требованиям- В22,5, F<sub>2300</sub>, W6. Для изготовления бетонной смеси применяли комплексную добавку СНВ+СЗ, что позволяло обеспечить содержание воздуха в смеси в пределах 4...6 % и морозостойкость бетона не ниже марки F<sub>2300</sub>. Следовательно, на стадии приготовления бетонной смеси обеспечивались все установленные требования. Анализ процесса изготовления блоков показал следующее. В возрасте 3...4 суток после набора бетоном прочности 70 % от проектной прочности В22,5 блоки отгружали на объект. В соответствии с техническими требованиями к продукции заводского изготовления этой прочности достаточно для отгрузки потребителю [5]. В силу организационных причин складирования блоки, изготовленные в ноябре-декабре 2003 г, сразу укладывали в зону переменного уровня, что было установлено по маркировки на блоках. Однако в соответствии с требованиями [15], пропаренные блоки допускается укладывать в зону переменного уровня после выдерживания не менее 15 суток при положительных температурах. На основании этого было сделано заключение, что несоблюдение сроков выдерживания бетона стало основной причиной разрушения поверхностного слоя после первого зимнего сезона. Специалистами компании «Трансстрой-Тест» было рекомендовано строителям переместить блоки с поверхностными разрушениями в подводную зону. Это решения было принято на основании того, что, с одной стороны, конструктивная особенность берегозащитного сооружения из фасонных блоков позволяла перемещать отдельные блоки из зоны переменного уровня в подводную зону без существенных затрат, с другой – лабораторные и экспериментальные натурные исследования, которые ранее проводились в лаборатории «Трансстрой-Тест», показали, что в подводной зоне дальнейшая деградация материала не происходит, поскольку отсутствуют основные разрушающие факторы – циклы замораживания и оттаивания и обмерзание льдом. Последующие обследования сооружения показали, что в подводной зоне процессы деградации бетона в поврежденных блоках прекратились, они сохраняют свои эксплуатационные показатели в течение 15 лет. Блоки, которые устанавливались в зону переменного уровня с предварительной выдержкой, сохраняют первоначальный внешний вид в течение всего периода эксплуатации – 15 лет.

Аналогичные случаи разрушения бетона из-за недостаточного срока выдержки бетона наблюдали при устройстве берегозащитного сооружения в порту Козьмино (Приморский край, г. Находка) в 2008 году (рисунок 2-А) и при реконструкции причальной стенки в порту Углегорск (о. Сахалин) в 2010 году (рисунок 2-Б). Данные примеры свидетельствуют о том, что не соблюдение одного из требований к технологии- срока выдерживания, приводит к серьезным последствиям. В силу конструктивной особенности морских берегозащитных сооружений из фасонных блоков типа тетраподов или гексабитов, эти последствия можно исправить без существенных затрат, как это было сделано на заводе СПГ или в порту Козьмино. Однако восстановление причальной стенки в порту Углегорск до работоспособного состояния потребовало значительных затрат. В зависимости от уровня потери экс-

плутационных свойств отказ можно классифицировать как по критичности, так и по причинам его возникновения. В рассмотренных случаях отказ относится производственному отказу, поскольку произошел вследствие производственных недоработок. Явный внезапный отказ обусловлен, с одной стороны, характером внешних воздействий- обмерзанием конструкций морским льдом, с другой- не обеспечены условия выдерживания бетона при положительных температурах после пропаривания. Есть все основания считать, что процесс накопления структурных дефектов в бетоне при обмерзании морским льдом происходит более интенсивно, чем при воздействии циклов замораживания и оттаивания от обычных отливно-приливных явлений в зоне переменного уровня вертикальных стенок морских причальных сооружений.



**Рисунок 2. – Характерный вид разрушения бетона в зоне переменного уровня после первого зимнего сезона: А – берегоукрепление из гексабитов в порту Козьмино (г. Находка, Приморский край, 2008); Б – причальная стенка в порту Углегорск (о. Сахалин, 2010).**

Следовательно, суровость реальных условий службы морских сооружений может отличаться от нормативной суровости, которая классифицируется по расчетной зимней температурой наружного воздуха [16]. Приведенные примеры служат доказательством того, что суровость условий является одним из параметров, который определяет скорость разрушения бетона. При оценке реальной суровости внешних воздействий следует учитывать такие параметры процесса обмерзания, как продолжительность и температуру. Опыт эксплуатации морских сооружений на побережье о. Сахалин дает основание полагать, что в зоне переменного уровня в зимний период при воздействии только отливно-приливных явлений без обмерзания конструкции льдом скорость накопления повреждений в структуре бетона происходит значительно медленнее и не приводит к внезапному разрушению бетона. Процесс обмерзания не моделируется при стандартных испытаниях на морозостойкость, поэтому при исследованиях [2] не выявлено влияние на пропаренные морозостойкие бетоны последующего выдерживания. Приведенные примеры показывают, что скорость разрушения пропаренного бетона зависит от продолжительности твердения при положительных температурах. Исходя из того, что продолжительность и температура в период ухода влияет на скорость гидратации и соответственно влияет на развитие прочности бетона. А.М. Невилль [10] предложил период выдерживания оценивать показателем «зрелости» бетона, который следует измерять в градусо-часах или в градусо-сутках. Установлено [18], что морозостойкость имеет более устойчивую связь с параметрами структуры бетона, чем с прочностью бетона. В соответствии с общими представлениями о цементных бетонах [1, 17, 18], в его структуре происходят деструктивные процессы и процессы упрочнения, которые можно назвать конструктивными. Исходя из полученных результатов, есть



основания предполагать, что при равной степени агрессивности внешних природно-климатических воздействий, характер развития этих процессов в бетоне зависит от уровня «зрелости» структуры к моменту начала эксплуатации. Состояние структуры бетона во времени будет определяться соотношением указанных процессов. Схематически развитие процессов формирования структуры бетона на стадии эксплуатации в зависимости от начального уровня зрелости структуры бетона показано на рисунке 3.

$$\Delta s = \Delta_k > \Delta_d \text{ или } \Delta s = \Delta_k < \Delta_d, \quad (1)$$

где  $\Delta s$  – показатель состояния структурной прочности бетона;  
 $\Delta_k$  – мера, характеризующая конструктивные процессы;  
 $\Delta_d$  – мера, характеризующая деструктивные процессы.

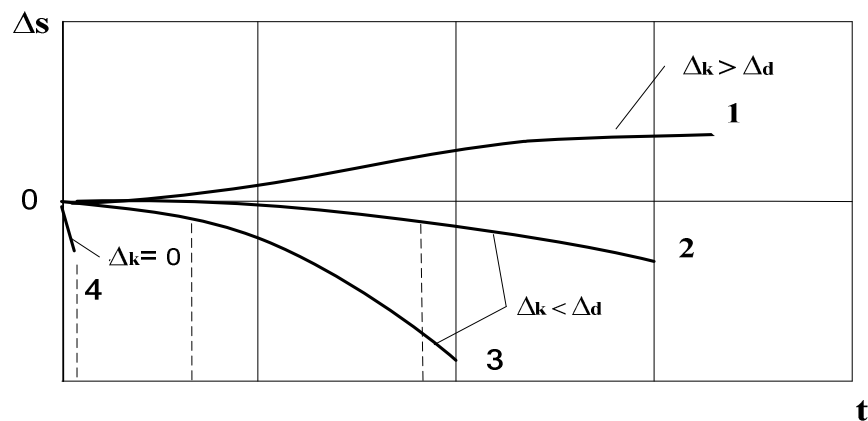


Рисунок 3. – Схематическое представление процесса формирования структуры бетона при морозных и солевых воздействиях для бетонов с различным уровнем зрелости структуры

Многочисленные исследования морозостойкости бетона и опыт эксплуатации, приведенный в данной статье, дает основание предполагать, что существует нормативный уровень зрелости структуры бетона, который позволяет обеспечить долговечность конструкции в конкретных условиях эксплуатации.

$$K_p^f \geq K_H^f, \quad (2)$$

где  $K_H^f$  – нормативном уровне зрелости структуры бетона;

$K_p^f$  – фактический уровень зрелости структуры бетона.

Условно можно принять, что в начальный период конструктивные и деструктивные процессы находятся в равновесии независимо от уровня зрелости бетона:

$$\Delta_k = \Delta_d, \text{ т.е. } \Delta s = 0.$$

При нормативном уровне зрелости структуры бетона:  $K_p^f = K_H^f$  перед началом эксплуатации структура должна формироваться с преобладанием конструктивных процессов, т.е.  $\Delta_k > \Delta_d$ . Схематически это представлено в виде кривой 1 на рисунке 3. Формирование структуры бетона при  $K_p^f < K_H^f$  происходит с преобладанием деструктивных процессов

( $\Delta_k < \Delta_d$ ) – кривые 2 и 3 на рисунке 3. При этом скорость деструктивных процессов будет

определяться величиной  $K_p^f$  к началу эксплуатационных воздействий. Рассмотренные в статье примеры разрушения бетона в сооружениях соответствует случаю, когда значение  $K_p^f$  имеет такое низкое значение, при котором наблюдается не деградационный, а внезапный отказ ( $\Delta_k = 0$ ) – кривая 4 на рисунке 3.

Опыт строительства морских гидротехнических сооружений на Дальнем Востоке свидетельствует о том, что от уровня зрелости структуры бетона к началу эксплуатации, который формируется в стадии изготовления конструкций и выдерживания бетона, зависит долговечность или расчетный срок службы сооружения. Следует отметить, что для железобетонных конструкций должны устанавливаться более высокие требования к обеспечению уровня зрелости структуры бетона, чем к бетонным конструкциям, поскольку в процессе эксплуатации железобетонных конструкций в расчетный срок службы не допускается снижение или потеря защитных функций бетона по отношению к арматуре. Исходя из приведенных примеров, для прогноза сроков службы строительных объектов целесообразно разрабатывать модели долговечности бетона с учетом показателя уровня «зрелости» структуры бетона перед началом эксплуатации.

**Заключение.** Опыт строительства морских причальных и берегозащитных гидротехнических сооружений в районах с тяжелыми гидрометеорологическими условиями показывает, что в зоне переменного уровня при обмерзании конструкций морским льдом разрушение бетона может происходить за первый зимний сезон. Фактически происходит не деградационный, а внезапный отказ. Это свидетельствует о том, что при обмерзании бетона степень суровости воздействия на структуру бетона более высокая, чем воздействие циклов замораживания и оттаивания от обычных приливно-отливных явлений в зоне переменного уровня вертикальных стенок морских причальных сооружений. Объективная оценка причин разрушения бетона в сооружениях, изготовленного по конкретной технологии, позволяет определить наиболее вероятные причины деградации и высокой скорости ее развития. Установлено, что одним из факторов, вызывающий внезапный отказ бетона, является недостаточность периода выдерживания (вызревания) после изготовления конструкций. Предлагается временной период выдерживания оценивать критерием «зрелости» структуры бетона ( $K^f$ ). Внезапный отказ бетона следует рассматривать, как один из частных случаев несоответствия, при котором  $K_p^f < K_H^f$ . Дальнейшие исследования в направлении определения параметров бетона, по которым можно рассчитывать критерий зрелости структуры, позволит осуществлять прогноза долговечности конструкций, изготовленных по конкретной технологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев [и др.]. – М. : Стройиздат, 1990. – 320 с.
2. Гладков, В.С. Рост прочности морозостойких бетонов после пропаривания / В.С. Гладков, Б.И. Поляков, Т.К. Егорычева / Вопросы долговечности бетона транспортных сооружений : сб. науч. тр. ЦНИИСа. – М., 1979. – с. 41–48.
3. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : ГОСТ 27751-2014. – Введен с 01.07.2015.
4. Надежность в технике. Термины и определения : ГОСТ 27.002-2015. – Введен с 01.03.2017.
5. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения : ГОСТ 13015—2012. – Введен с 01.01.2014.

6. Иванов, Ф.М. Исследование морозостойкости бетона / Ф.М. Иванов // Защита от коррозии строительных конструкций и повышение долговечности. – М., 1969.
7. Леонович, С.Н. Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения / С.Н. Леонович. – Брест : БрГТУ, 2006. – 380 с.
8. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях : моногр. : в 2 ч. / С.Н. Леонович [и др.]. – Минск : БНТУ, 2016. – Ч. 2. – 393 с.
9. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин [и др.]. – М. : Стройиздат, 1980.
10. Невиль, А.М. Свойства бетона / А.М. Невиль ; пер. с англ. под ред. Ф.М. Иванова. – М. : Стройиздат, 1972. – 344 с.
11. Пухонто, Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений / Л.М. Пухонто. – М. : АСВ, 2004. – 424 с.
12. Свиридов, В.Н. Оценка долговечности бетона в конструкциях морских сооружений по опыту строительства на Дальнем Востоке / В.Н. Свиридов, В.Д. Малюк // Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее», Москва, 12-16 мая 2014 г. : в 7 т. / МИСИ-МГСУ. – М., 2014. – Т. 3. – С. 388–398.
13. Свиридов, В.Н. Применение технологии высокоморозостойких бетонов в практике морского гидротехнического строительства на Дальнем Востоке / В.Н. Свиридов, В.Д. Малюк // Стихия. Строительство. Безопасность : сб. тр. – Владивосток, 2008.
14. Степанова, В.Ф. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций / В.Ф. Степанова, В.Р. Фаликман // Бетон и железобетон – взгляд в будущее : науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону, М., 12-16 мая 2014 г. : в 7 т. / МИСИ-МГСУ. – М., 2014. – Т. 3 : Арматура и система армирования. Фибробетоны и армоцементы. Проблемы долговечности. – С. 430–444.
15. Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения : СНиП 3.07.02-87. – Введен с 01.07.1987.
16. Защита строительных конструкций от коррозии : СП 28.13330.2012. – Введен с 08.05.2017.
17. Шейкин, А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Л., 1989.
18. Шестоперов С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений / С.В. Шестоперов. – М. : Транспорт, 1976.

## РАСЧЕТНЫЙ СРОК СЛУЖБЫ МОРСКИХ БЕРЕГОЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

<sup>1</sup>В.В. Малюк, <sup>2</sup>С.Н. Леонович, <sup>2</sup>Н.А. Будревич

<sup>1</sup>ООО «Трансстрой-Тест», г. Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

email: mw.77@mail.ru, snleonovich@yandex.ru, nellibudrevich@yandex.by

*Рассмотрены нормативные основы в области обеспечения долговечности. Проанализирован опыт строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в тяжелых гидрометеорологических условиях морского побережья о. Сахалин. Приведены результаты проектирования долговечности бетона на предписывающей основе нормативных документов. Предложен временной период, который можно на стадии проектирования принять за расчетный срок службы сооружений. Выявлены основные причины деградационных отказов бетона, наблюдаемые в ранние сроки эксплуатации.*

*Ключевые слова: бетон, долговечность, расчетный срок службы, деградация, морские гидротехнические сооружения.*

## DESIGN TIME OF THE SERVICE OF MARITIME SHORE-PROTECTIVE STRUCTURES

<sup>1</sup>B. Malyuk, <sup>2</sup>S. Leonovich, <sup>2</sup>N. Budrevich

<sup>1</sup>Transstroy-Test, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk

email: mw.77@mail.ru, snleonovich@yandex.ru, nellibudrevich@yandex.by

*The regulatory framework for durability is reviewed. The experience of construction and operation of hydraulic structures in heavy hydrometeorological conditions of the sea coast of Sakhalin. The results of designing the durability of concrete on the prescriptive basis of normative documents are given. A time period is proposed, which can be taken at the design stage for the estimated term of the facilities service. The main causes of degradation failure of concrete, observed in the early period of operation, are revealed.*

*Keywords: concrete, durability, estimated service life, degradation, marine hydraulic structures.*

В последние годы к вопросам долговечности бетона привлечено внимание многих специалистов, расчёты конструкций на долговечность становятся нормой во многих странах мира [3, 6, 13]. Применяемый в течение многих лет в отечественной и зарубежной практике термин «долговечность конструкций» являлся субъективным и часто трудно определяемым количественно. До настоящего времени общепринятого и нормированного метода расчета бетонных и железобетонных конструкций на долговечность не существует. Однако с принятием таких нормативно-правовых актов, как закона «О техническом регулировании» [16] и технического регламента о безопасности зданий и сооружений [17], создана правовая основа в области обеспечения безопасности зданий и сооружений, определены требования к обеспечению долговечности строительных объектов. На основании этих законов стандартизированы термины и основные понятия, даны определения этим понятиям, которые наполняют конкретным смыслом термин «долговечность» [2]. В связи с этим необходимо выделить ряд положений, которые касаются долговечности. Во-первых, введено понятие жизненный цикл здания или сооружения- период, в течение которого осу-

ществляются проектирование, строительство и эксплуатация. Принципиальное отличие и важность данного подхода к решению проблемы обеспечения безопасности, эксплуатационной пригодности и долговечности заключается в следующем. Если ранее в сфере строительства основными действующими лицами были проектировщики и строители, то с принятием технического регламента о безопасности зданий и сооружений появился новое лицо – эксплуатант. Это обусловлено тем, что сегодня внимание общества обращено не только на стоимость возведения, но и на возрастающую с каждым днем стоимость их эксплуатации. Однако в настоящее время нормативные документы, на основании которых должны реализовываться требования технического регламента находятся на стадии разработки. Например, нормативный документ по правилам эксплуатации [11] принят только в феврале 2017 года. Выделение в градостроительной деятельности эксплуатанта, который наделяется законными правами, безусловно, потребует корректировать подход к обеспечению долговечности на стадии проектирования и строительства. Известно, что основные проблемы, связанные с некачественным проектированием и строительством, приходится решать на стадии эксплуатации. Поэтому технический регламент [17] обязывает в целях предупреждения действий, вводящих в заблуждение эксплуатанта, в проектной документации здания или сооружения указывать информацию о сроках эксплуатации здания или сооружения и их частей. Данная информация необходима эксплуатанту для эффективной организации работ по надлежащему содержанию объекта. Основой эксплуатационной деятельности является минимизация затрат в заданные сроки эксплуатации. Цель эксплуатации – минимальная стоимость срока службы, поэтому на стадии проектирования должны задаваться не только стандартные временные параметры [2]: расчетный срок службы и срок службы сооружения, но и качественные характеристики, посредством которых при строительстве будет обеспечена работоспособность строительного объекта в заданные временные периоды на стадии эксплуатации [17].

В действующем нормативном документе [2] даны понятия терминам долговечность и временным параметрам в период эксплуатации сооружения:

- долговечность: способность строительного объекта сохранять прочностные, физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы;
- расчетного срока службы: установленный в строительных нормах или в задании на проектирование период использования строительного объекта по назначению до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием; расчетный срок службы отсчитывается от начала эксплуатации объекта или возобновления его эксплуатации после капитального ремонта или реконструкции;
- срок службы: продолжительность нормальной эксплуатации строительного объекта с предусмотренным техническим обслуживанием и ремонтными работами (включая капитальный ремонт) до состояния, при котором его эксплуатация недопустима или нецелесообразна.

Как видно, перед проектировщиком стоит достаточно сложная задача, которая может решаться только на основе надежных методов расчета или прогноза временных периодов эксплуатации:

$$T_L = \sum T_s^1 + T_s^{2s} + \dots + T_s^n, \quad (1)$$

где  $T_L$  – срок службы сооружения, годы;

$T_s$  – расчетный срок службы, годы.

Следовательно, мерой долговечности является расчетный срок службы  $T_s$ . В период срока службы сооружения  $T_L$  временных периодов  $T_s$  может быть несколько. Для морских



гидротехнических сооружений целесообразно величину периода  $T_s$  рассчитывать из условия минимизации их количества в период срока службы  $T_L$ , поскольку особенность морских гидротехнических сооружений – малая ремонтпригодность и высокая стоимость капитального ремонта.

В настоящее время проектная концепция по долговечности имеет предписывающий характер. Для реализации вышеуказанных требований технического регламента [17] отсутствует нормативная база, позволяющая обосновано назначить требования к параметрам строительного объекта, которые позволяют гарантированно обеспечить безопасную и эффективную эксплуатацию в расчетный срок службы.

В соответствии с принятой классификацией гидротехнических сооружений [9], нормирование сроков службы морских гидротехнических сооружений не предусмотрено. Правом назначения срока службы наделяется заказчик, который может руководствоваться рекомендациями нормативного документа [2]: для сооружений, эксплуатируемых в условиях морской среды, рекомендуемый срок службы не менее 25 лет.

Известно, долговечность зависит, прежде всего, от качества принятых проектных решений, которые должны реализовываться в процессе строительства. Поэтому подход к назначению долговечности (расчетного срока службы) основанный на интуиции и опыте, который применяется в настоящее время, безусловно, не будет удовлетворять эксплуатанта.

В течение последних 60 лет проблема обеспечения долговечности бетона конструкций морских гидротехнических сооружений решалась путем повышения морозостойкости. Движение в направлении усовершенствования свойств бетона и технологии изготовления бетонной смеси позволили разработать принципиальные основы технологии бетонов высокой морозостойкости [4]. Опыт строительства показал, что это направление продуктивно и представляет определенный интерес. Основным достижением проведенных исследований явилось то, что было установлена важная роль в обеспечении высокой морозостойкости воздухововлекающих добавок. Во второй половине прошлого столетия эти технологии были использованы на строительстве морских сооружений в суровых климатических условиях СССР. Впервые они были использованы при строительстве в 1960 г Кольской ПЭС. В дальнейшем систематические исследования по морозостойкости бетона и долговечности морских гидротехнических сооружений в течение 1970-1990 гг. проводились на Дальнем Востоке [8, 9]. Известный ученый в области изучения долговечности бетона транспортных сооружений Ф.М. Иванов в своей работе [1] отметил, что исследования, предпринятые в СССР на испытательных стендах Кольской ПЭС и Сахалинской научно-исследовательской лаборатории ЦНИИС Минтрансстроя, позволили сделать заключение, что проблема создания стойких бетонов для морских сооружений решена. Выработанные в течение многих лет приемы получения бетонов высокой морозостойкости нашли отражение в нормативных документах [7, 12, 14, 15]. Сегодня нет проблем в деле изготовления долговечного бетона даже для весьма агрессивных и коррозионных сред. Подтверждением этого является опыт строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений на побережье о. Сахалин в течение последних 40 лет, проектирование которых осуществлялось на предписывающей основе нормативных документов [7, 14, 15]. В отношении данных сооружений имеется полная информация о бетоне, материалах для бетона, технологии изготовления конструкций для этих сооружений [8]. В течение эксплуатации сооружений проводятся периодические обследования с целью оценки состояния бетона [9]. Результаты выполненных исследований позволили выделить существенные факторы, влияющие на стойкость бетона в зоне переменного уровня, что позволяет представить долговечность в виде функции:

$$D = f(C_m; C_x; C_d; C_t; C_p; C_l), \quad (2)$$

где  $D$  – долговечность или расчетный срок службы конструкции (изделия), годы;  
 $C_m$  – показатель, характеризующий качество материалов бетона;

$C_x$  – показатель, характеризующий состав бетона;

$C_d$  – показатель, характеризующий эффективность структурообразующей добавки;

$C_t$  – показатель, характеризующий качество приготовления бетона;

$C_p$  – показатель, характеризующий качество изготовления конструкции (изделия);

$C_l$  – показатель, характеризующий «зрелости» структуры бетона к началу эксплуатации.

Как видно из выражения (2) долговечность – это комплексное свойство, зависящее от многих факторов. Следует отметить, что показатели выражения (2), в свою очередь, является комплексным

$$C_{(m,x,d,p,l)} = f \cdot (x_1, \dots, x_n), \quad (3)$$

где  $x_1 \dots x_n$  – качественные характеристики материалов бетона или параметры технологического процесса.

При обеспечении нормативных свойств материалов и параметров технологических процессов ( $x$ ) показатели ( $C$ ) в выражении (2) должны иметь базовое значение равное 1. Опыт эксплуатации сооружений показывает, что для решения практических вопросов обеспечения долговечности в пределах минимум 40 лет достаточно выполнение предписывающих требований нормативных документов. Следовательно, при  $C_{(m,x,d,p,l)} = 1$  долговечность (расчетный срок службы) будет составлять не менее 40 лет, т.е.  $D > 40$ .

В связи с отсутствием данных, которые позволяют оценить значимость для долговечности каждого из показателей ( $C$ ), приведенных в выражения (2), нельзя прогнозировать долговечность при условии, когда  $C \leq 1$ . Наблюдаемые случаи деградационного отказа в начальной стадии эксплуатации, как правило, связаны с не соблюдением предписывающих требований на этапе изготовления и выдерживания конструкций, т.е. когда показатели  $C_p$  и  $C_l$ , меньше 1. Поэтому для решения практических вопросов прогнозирования долговечности необходимо установить влияние на морозостойкость показателей  $C_p$  и  $C_l$ . Из-за отсутствия методов оценки морозостойкости бетона в конструкциях при показателях  $C_p$  и  $C_l$  меньше 1, возникает неопределенность в прогнозе долговечности реальных конструкций.

**Заключение.** Опыт строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в тяжелых гидрометеорологических условиях морского побережья о. Сахалин показал, что проектирование долговечности бетона на предписывающей основе нормативных документов позволяет обеспечить долговечность бетону не менее 40 лет. Это период при проектировании сооружения можно принять за расчетный срок службы конструкций в зоне переменного уровня. Отсутствие методов оценки морозостойкости бетона в конструкциях и отсутствие данных о фактической морозостойкости бетона в конструкциях не позволяет надежно прогнозировать долговечность на стадии эксплуатации сооружения. В связи с этим разработка методов оценки морозостойкости бетона в конструкциях является одним из наиболее важных направлений исследований для разработки методов расчета срока службы конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев [и др.]. – М. : Стройиздат, 1990. – 320 с.

2. Гладков, В.С. Рост прочности морозостойких бетонов после пропаривания / В.С. Гладков, Б.И. Поляков, Т.К. Егорычева / Вопросы долговечности бетона транспортных сооружений : сб. науч. тр. ЦНИИСа. – М., 1979. – с. 41–48.
3. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : ГОСТ 27751-2014. – Введен с 01.07.2015.
4. Надежность в технике. Термины и определения : ГОСТ 27.002-2015. – Введен с 01.03.2017.
5. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения : ГОСТ 13015-2012. – Введен с 01.01.2014.
6. Иванов, Ф.М. Исследование морозостойкости бетона / Ф.М. Иванов // Защита от коррозии строительных конструкций и повышение долговечности. – М., 1969.
7. Леонович, С.Н. Прочность конструктивных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения / С.Н. Леонович. – Брест : БрГТУ, 2006. – 380 с.
8. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях : моногр. : в 2 ч. / С.Н. Леонович [и др.]. – Минск : БНТУ, 2016. – Ч. 2. – 393 с.
9. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин [и др.]. – М. : Стройиздат, 1980.
10. Невиль, А.М. Свойства бетона / А.М. Невиль ; пер. с англ. под ред. Ф.М. Иванова. – М. : Стройиздат. 1972. – 344 с.
11. Пухонто, Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений / Л.М. Пухонто. – М. : АСВ, 2004. – 424 с.
12. Свиридов, В.Н. Оценка долговечности бетона в конструкциях морских сооружений по опыту строительства на Дальнем Востоке / В.Н. Свиридов, В.Д. Малюк // Бетон и железобетон- взгляд в будущее : науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону, Москва, 12-16 мая 2014 г. : в 7 т. / МИСИ-МГСУ. – М., 2014. – Т.3. – с. 388–398.
13. Свиридов, В.Н. Применение технологии высокоморозостойких бетонов в практике морского гидротехнического строительства на Дальнем Востоке / В.Н. Свиридов, В.Д. Малюк // Стихия. Строительство. Безопасность : сб. тр. – Владивосток : Дальнаука, 2008.
14. Степанова, В.Ф. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций / В.Ф. Степанова, В.Р. Фаликман // Бетон и железобетон – взгляд в будущее : науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону, Москва, 12-16 мая 2014 г. : в 7 т. / МИСИ-МГСУ. – М., 2014. – Т. 3 : Арматура и система армирования. Фибробетоны и армоцементы. Проблемы долговечности. – С. 430–444.
15. Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения : СНиП 3.07.02-87. – Введен с 01.07.1987.
16. Защита строительных конструкций от коррозии : СП 28.13330.2012 – Введен с 08.05.2017.
17. Шейкин, А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Л., 1989.
18. Шестоперов С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений / С.В. Шестоперов. – М. : Транспорт, 1976.

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАБОТУ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОДОРОГ

С.Д. Семенюк, И.В. Морозов

Белорусско-Российский университет, Могилёв

email: igormy.morozov@gmail.com

*Монолитные железобетонные покрытия применяются для строительства автодорог, в основном постоянных. Основание оказывает огромное влияние на работу покрытия в долгосрочной перспективе, особенно в условиях нашего климата, которым обусловлено большое количество осадков, неустойчивость погоды и достаточно высокая амплитуда колебания температур (в пределах срока эксплуатации покрытия). Поэтому, при соответствующих расчетах следует учесть степень влияния конкретных факторов на эксплуатационные показатели итогового покрытия.*

*Ключевые слова: дорожные покрытия, железобетон, основания, легкий бетон, гладкость, разрушение.*

## FACTORS AFFECTING THE WORK OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE PAVEMENT OF ROADS

S. Semeniuk, I. Morozov

Belarussian-Russian University, Mogilev

email: igormy.morozov@gmail.com

*Monolithic reinforced concrete pavement are used for the construction of highways, mostly permanent ones. The foundation has a huge impact on the operation of the coating in the long term, especially in the conditions of our climate, which is caused by a large amount of precipitation, weather instability and a sufficiently high temperature fluctuation amplitude (within the lifetime of the coating). Therefore, in the appropriate calculations, the influence of specific factors on the operating parameters of the final coating should be considered.*

*Keywords: road pavement, reinforced concrete, foundations, lightweight concrete, smoothness, destruction.*

На конечные эксплуатационные характеристики дорожного покрытия, такие как гладкость, прочность и период безотказной эксплуатации, оказывает значительное влияние основание дорожной одежды. Для поддержания этих свойств на высоком уровне основание должно обладать определёнными качествами, одним из которых является гладкость. Это свойство необходимо для создания равномерной платформы для дальнейшего устройства дорожного покрытия.

Некоторые исследователи рекомендуют избегать применения «сырых» материалов, в частности, простого щебня, и заменить их легкими бетонами для достижения этой самой гладкости. Гладкость является одним из критических факторов, поскольку колесо автомобиля, перемещаясь по покрытию должно передавать на него равномерную нагрузку, что невозможно при наличии перепадов на покрытии. Повышение нагрузки можно описать в данном случае двумя путями. В первом случае участок с просадкой работает по принципу, обратному принципу работы мостов (когда мост специально делается радиальным с целью уменьшения нагрузки на покрытие и опоры) и покрытие испытывает повышенные нагрузки.

Работу покрытия при этом можно показать следующим образом.

Под колесом образуется участок с возникающими внутренними напряжениями, которые имеют разный знак и в месте, где знак меняется, покрытие подвергается воздействию изгибающих усилий. Схематически это показано на рисунке 1.

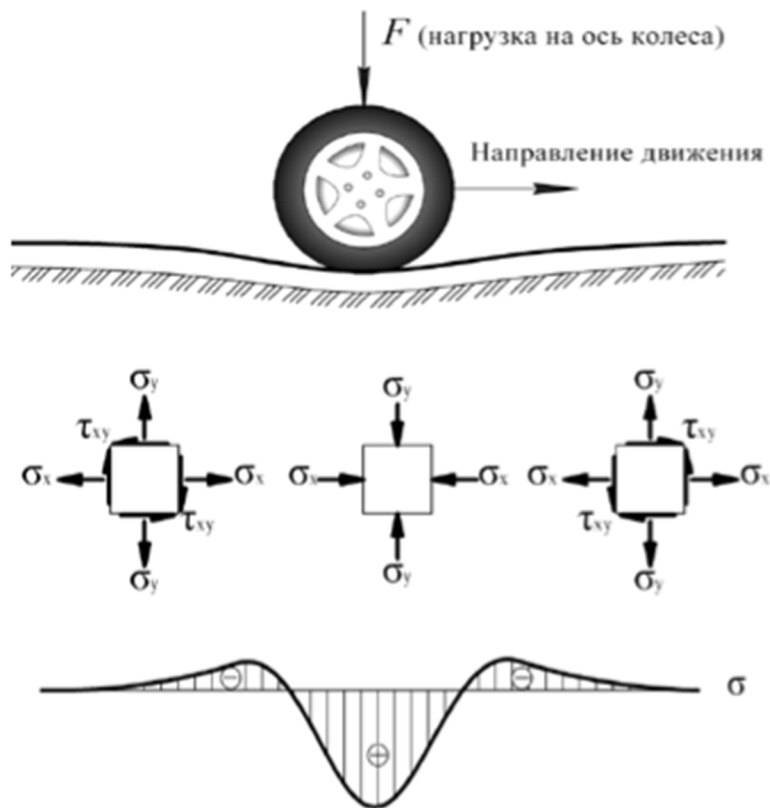


Рисунок 1. – Схема усилий, возникающих в плите

В случае наезда на неровность небольшого размера, работа покрытия в этой области близка к работе сборных плит покрытия в пределах швов.

Выбоины представляют собой тип разрушения, который обычно происходит между близко расположенными трещинами в покрытии. Они занимают место в плите, расположенное между двумя последовательными поперечными трещинами, продольной трещиной либо краем дороги. Типичная выбоина обычно инициирует глубокую трещину в сочетании с эрозией несущих слоев между двумя близко расположенными поперечными трещинами. Прогрессирование такого вида разрушения продолжается под воздействием многоцикловых нагружений и может привести к серьезным последствиям. На рисунке 2 показаны разрушения в области этой неровности.

Важным является жесткость поверхности основания. Это свойство увеличивает практическую точность установки арматурных каркасов в будущей плите покрытия;

Одинаковость коэффициентов трения на поверхности основания в пределах соседних плит покрытия (участков плиты, разделенных деформационными швами и трещинами, образованными в процессе схватывания бетона и дальнейшей его эксплуатации). Это улучшает работу самой плиты и, как показывает статистика, снижает вероятность появления поперечных трещин;

Кроме того, основание не должно подвергаться эрозии в течение всего срока эксплуатации. Основания из легких бетонов являются наиболее удачными и подстилающие слои реже подвергались эрозии при условии, что бетон имел достаточную прочность. Также меньшей эрозии подвергались основания дорог, имевших широкую бетонную обочину.

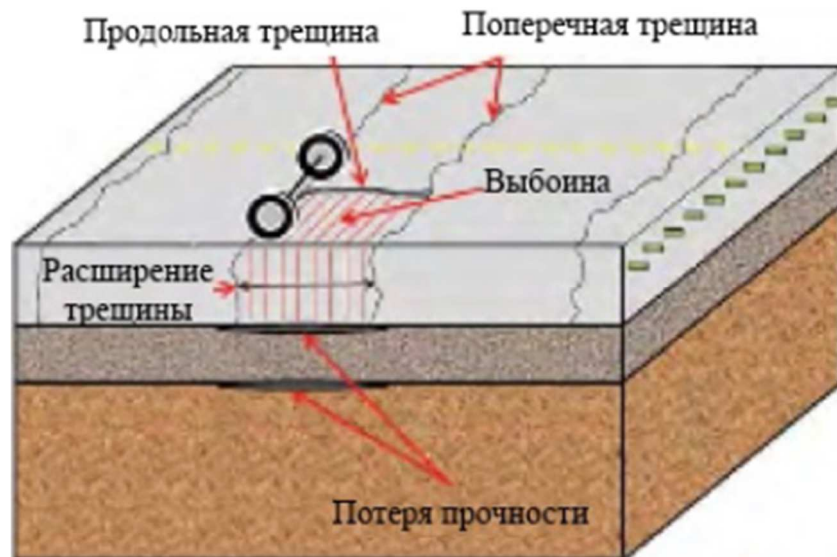


Рисунок 2. – Разрушение в области неровности

Считается, что в сборных покрытиях разрушение начинается со стыков. Если рассмотреть монолитное покрытие, то в нем всегда есть поперечные микротрещины усадочного происхождения, которые в идеальных условиях имеют определенный шаг расположения. Работу покрытия в зоне этих микротрещин можно рассматривать так же, как работу шва покрытия из сборных плит. Кроме микротрещин, необходимо обращать внимание на перепады уровня покрытия, поскольку колесо автомобиля при наезде на каждую такую неровность взаимодействует с ней по все той же схеме «колесо-шов сборного покрытия», и, как следствие, можно констатировать, что в таких местах также начинается разрушение. Согласно рисунку 3 можно сделать вывод, что график зависимости количества выбоин на километр дороги в процессе эксплуатации имеет вид экспоненциальной зависимости. Это означает, что микротрещины и неровности уровня покрытия, возникающие из-за неправильной работы основания, являются критическим фактором при расчете плиты.

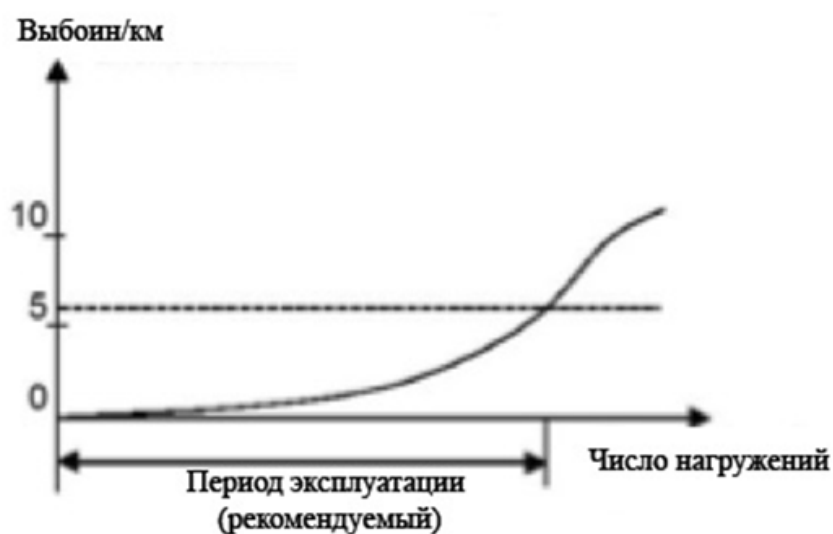


Рисунок 3. – Зависимость числа выбоин от количества циклов нагружения

На рисунке 3 удовлетворительное количество выбоин выбрано на уровне 5 выбоин/км дороги.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Tayabji, S.D. Preliminary Evaluation of LTPP Continuously Reinforced Concrete (CRC) Pavement Test Sections / S.D. Tayabji, O. Selezneva, Y.J. Jiang // Report FHWA-RD-99-086, FHWA, Washington, D.C., 1999.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials, Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice, AASHTO, Washington, D.C., 2008.
3. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report Research Project NCHRP 1-37A, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2004.
4. American Concrete Pavement Association, The Concrete Pavement Restoration Guide, Technical Bulletin TB-020P, ACPA, Skokie, 1997.
5. J. Harvey, J. Meijer, A. Kendall, TechBrief: Life Cycle Assessment of Pavements, FHWA-HIF-15-001, FHWA, Washington, D.C., 2014.
6. Rao, S. Characterization of Effective Built-in Curling and Concrete Pavement Cracking on the Palmdale Test Sections, Research / S. Rao, J.R. Roesler // Report UCPRC-RR-2005-09, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2005.

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ

А.Н. Поляков; А.П. Кремнёв

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.poliakov@psu.by, kremnev\_si@mail.ru

*Рассматривается применение метода георадарного зондирования при проведении инженерных изысканий. Приведены примеры успешного использования георадарного зондирования для решения различных задач.*

*Ключевые слова: георадар, георадарное зондирование, инженерные изыскания.*

## THE EXPERIENCE OF APPLICATIONS OF GPR METHOD FOR ENGINEERING SURVEYS

A. Paliakou, A. Kremniou

Polotsk State University, Belarus

email: a.poliakov@psu.by, kremnev\_si@mail.ru

*This article describes the applications of GPR method for engineering surveys. The article describes an examples of the successful GPR applications for solving various problems.*

*Keywords: GPR, ground penetration radar, engineering surveys.*

Георадарное зондирование, как метод исследования грунтов основания, находит всё более широкое применение при проведении инженерных изысканий.

Георадарное зондирование предоставляет возможность наблюдать непрерывную целостную картину строения грунтов оснований, грунтовых насыпей и конструкций, совмещённых с грунтовой средой как в плане, так и по глубине [1–5]. Данный метод позволяет получить непрерывный профиль грунтового основания на значительную глубину, обнаружить неоднородности и идентифицировать их. При этом обеспечивается высокая точность локализации объектов, предметов и границ раздела геологических слоев, глубины их залегания.

Результаты георадарного зондирования записываются в виде профилей, состоящих из совокупности отдельных трасс. Трасса – одно физическое измерение в точке, т.е. один акт послышки-приёма зондирующего сигнала. На профиле границы раздела сред отображаются почти в том виде, в каком они есть на самом деле.

Так как на этапе съёмки профилей скорость распространения сигнала в исследуемой среде неизвестна, запись результатов зондирования ведётся в глубинном формате, то есть фиксируется амплитуда отражённого сигнала и время его двойного пробега. Глубинность исследования зависит от предполагаемого времени ожидания отклика зондирующего сигнала от нижней границы исследуемого объекта, так что временной интервал записи (развертка) превышает двойное время пробега до самого глубокого объекта исследований. Основанием для выбора интервала записи служат сведения о глубинах и предполагаемые значения скоростей распространения электромагнитных волн в среде. Представление результатов георадарного зондирования в глубинном формате возможно после уточнения скорости распространения сигнала в исследуемой среде на стадии постобработки.

Применение георадарного зондирования на стадии инженерно-геологических изысканий позволяет размещать буровые скважины в местах с наиболее выраженными неоднородностями строения грунтового массива [6].

Применение георадарного зондирования в качестве одного из методов оперативного контроля качества позволяет достаточно быстро получить фактическое строение возводимых земляных сооружений различных типов, а так же конструкций, совмещённых с грунтовой средой [7,8]. При необходимости может быть построена трехмерная модель исследуемого объекта.

В тоже время, как и любой другой метод исследований, георадарное зондирование не лишено недостатков. Во-первых, глубина зондирования и разрешение георадара сильно зависят от электрофизических свойств изучаемой среды. В средах с высокой проводимостью метод георадиолокации может быть неэффективным. Во-вторых, для обнаружения объекта или границы необходимо, чтобы объект имел существенное отличие диэлектрической проницаемости от вмещающей среды. И в третьих, интерпретация георадарных данных субъективна и во многом зависит от опыта оператора.

Ниже приведены наиболее интересные примеры применения георадарного зондирования при проведении инженерных изысканий.

На рисунке 1 показан профиль вдоль трассы автодороги Полоцк-Россоны, полученный в рамках выполнения госбюджетной темы ГБ4026 «Диагностика современных движений земной коры Беларуси по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований» в рамках ГПОФИ «Недра Беларуси». Обнаружены как объекты искусственного происхождения, так и геологические образования природного происхождения (предположительно палеорусло).

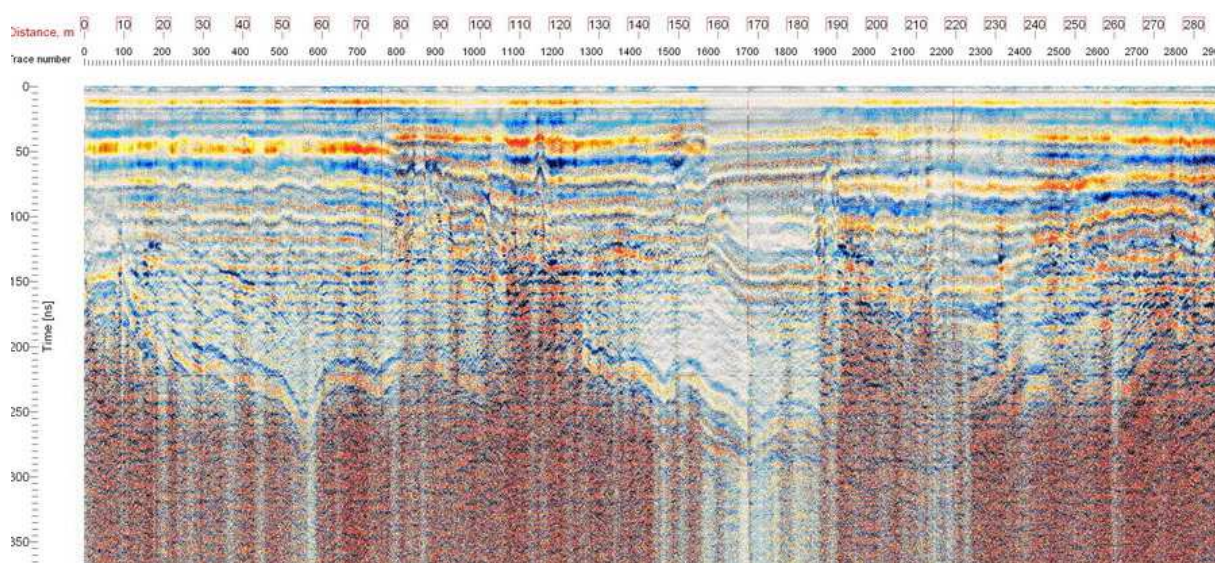


Рисунок 1. – Участок трассы Полоцк-Россоны (над предполагаемым палеоруслом)

Георадарное зондирование применялось для проверки качества уплотнения насыпи, используемой в качестве основания для резервуара на новой базе хранения нефти ОАО «Нафтан», г. Новополоцк. В результате обследования была выявлена прослойка некачественно уплотнённого грунта, ставшая причиной неравномерных деформаций искусственного основания резервуара и кольцевого железобетонного фундамента. На профиле, представленном на рисунке 2, прослойка неуплотнённого грунта на глубине 2.7-3.7 м выделяется слабыми контрастностью и интенсивностью окраски.



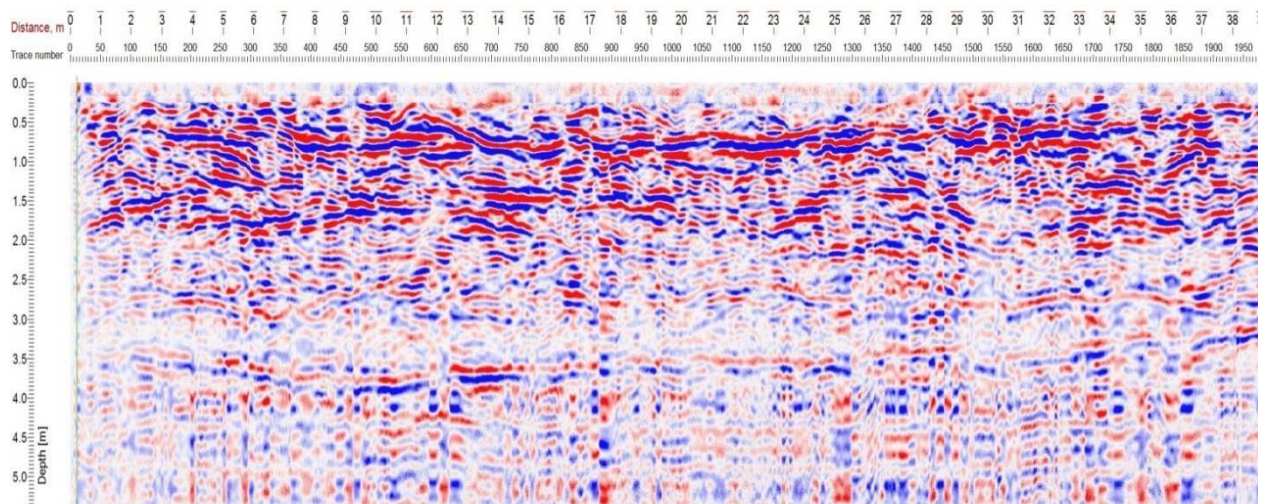


Рисунок 2. – Грунтовая насыпь основания резервуара

Примером использования георадарного зондирования для определения технического состояния и фактического строения железнодорожной насыпи является исследование одного из участков перегона Верхнедвинск–Свольно. Исследование проводилось для выяснения причин возникновения постоянных неравномерных деформаций насыпи.

Визуальное обследование показало, что прилегающая к проблемному участку территория является заболоченной низиной. Георадарные профили длиной более трёхсот метров были выполнены по верху насыпи вдоль железнодорожного полотна. Внутри тела насыпи и под ней зафиксированы сигналы, которые можно идентифицировать как инженерные коммуникации различного типа (кабели, трубопровод, дренажные трубы). Кроме того, на профилях обнаружен ряд искусственных объектов неизвестного происхождения.

Кроме того, на профиле достаточно чётко выделяется засыпанное в процессе строительства природное понижение рельефа (возможно старое русло ручья, болото), где и происходило проседание грунта. Были выявлены участки, характеризующиеся залеганием насыпных грунтов значительной мощности, прослойки торфа в основании насыпи, установлена выраженная неравномерность напластований.

На основании полученных результатов получена модель насыпи на интересующем участке (рис. 3).

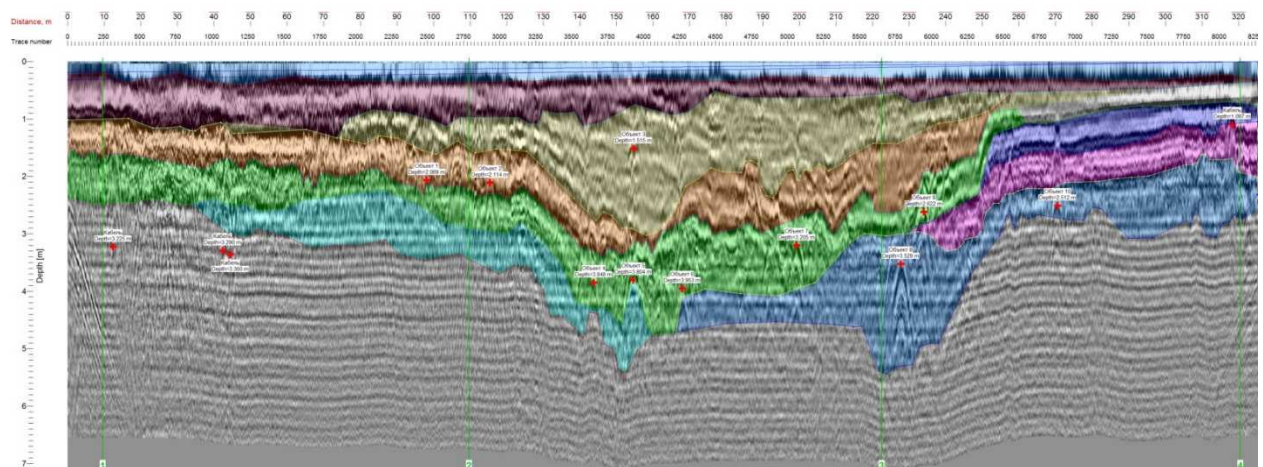


Рисунок 3. – Модель строения участка железнодорожной насыпи

Георадиолокационное зондирование применялось для исследования грунтов по трассам прокладываемых под пр. Победителей в г. Минске футляров подземных силовых кабелей. Работы проводились в районе автомобильной развязки на пересечении просп. Победителей и ул. Орловской.

В результате исследований определена мощность насыпных грунтов, на профилях выделен ряд объектов техногенного происхождения. В нижележащих слоях грунта природного сложения обнаружены твёрдые включения в виде валунов практически на всём протяжении исследуемых трасс. Наиболее крупные объекты отмечены на профилях (рис. 4).

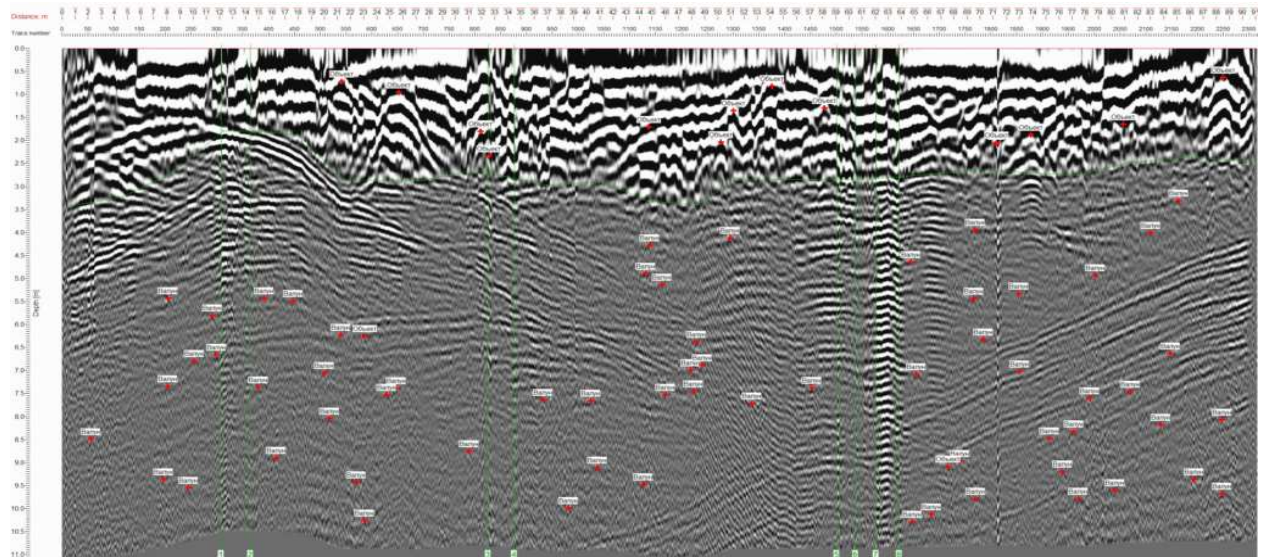


Рисунок 4. – Модель участка прокладки футляров подземных силовых кабелей

Распространённой проблемой является определение шага и длины свай при обследовании фундаментов зданий и сооружений в случае отсутствия проектной документации. Одним из основных методов определения местонахождения свай при помощи георадара является поиск зон так называемой «звучащей записи» [1-3]. В качестве примера на рисунке 5 приведен участок георадарного профиля вдоль фундамента промышленного здания в Гомеле. В центре изображения (центр сваи совпадает с трассой 550) отображается «звучащий сигнал» от сваи, при этом вблизи сваи видны следы смещения слоёв грунта при забивке сваи. Свая уверенно прослеживается до глубины 7,6–7,8 м, ниже наблюдается только «волновое эхо» и затухание сигнала (подобная волновая картина характерна для забитых свай).

При комплексном обследовании технического состояния конструкций существующих фундаментов и полов здания цеха стеклошариков (цех №12) ОАО «Полоцк-Стекловолокно» было установлено, что глубина забивки свай существующих фундаментов составляет не менее 10–11 м от уровня пола цеха, что соответствует проекту. Фрагмент георадарного профиля возле фундамента приведен на рисунке 6.

Кроме того, при проведении данного обследования под бетонной подготовкой обнаружены пустоты, что свидетельствует о развивающемся процессе самоуплотнения грунта в данных зонах. Указанные зоны разуплотнения четко прослеживаются на георадарном профиле до 3 м в стороны от границ технологического приямка (рис.7).



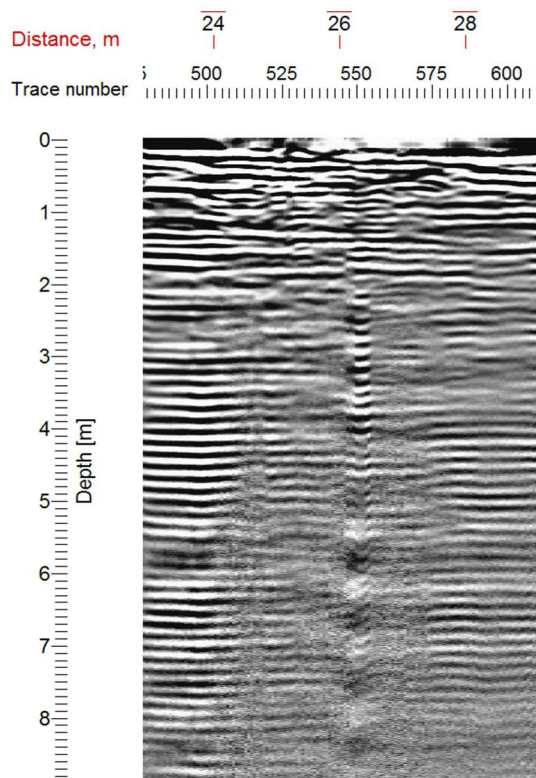


Рисунок 5. – Забивная свая,  
г. Гомель

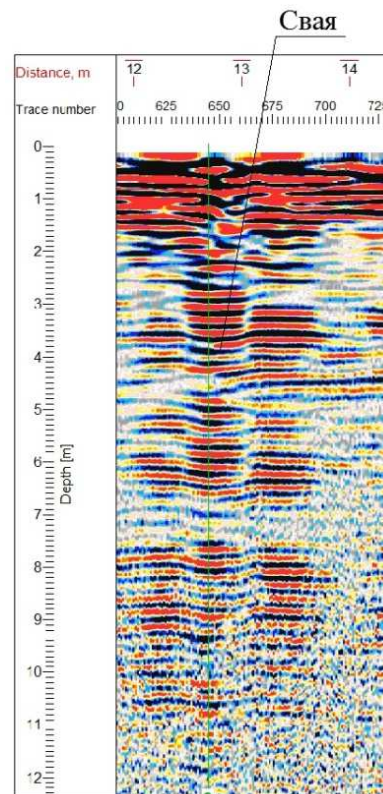


Рисунок 6. – Забивная свая,  
г. Полоцк (ОАО «Полоцк-Стекловолокно»)

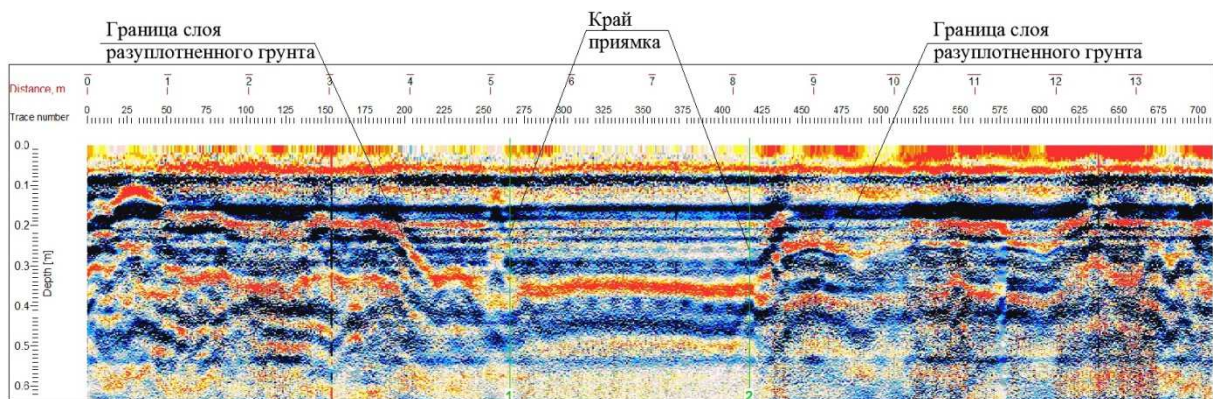


Рисунок 7. – Зоны разуплотненного грунта возле технологического траншеи  
(ОАО «Полоцк-Стекловолокно»)

Таким образом, георадарное зондирование позволяет решать самые различные геотехнические задачи на высоком качественном уровне и при минимальных затратах. В практике строительства наибольшее применение георадарное зондирование нашло при оценке фактического литологического строения грунтовых оснований как вновь возводимых зданий и сооружений, так и существующих, контроля качества выполняемых работ при возведении насыпных сооружений, поиска подземных коммуникаций, подземных объектов техногенного и природного характера, выявления скрытых дефектов и т.д.

Применение георадарного метода для решения различных инженерных задач в настоящее время становится всё более актуальным. Это объясняется простотой и удоб-



ством проведения полевых работ, высоким уровнем достоверности результатов исследований и существенным увеличением производительности изыскательских работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Владов, М.Л. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
2. Старовойтов, А.В. Интерпретация георадиолокационных данных : учеб. пособие / А.В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ, 2008. – 192 с.
3. Кулижников, А.М. Георадары в дорожном строительстве / А.М. Кулижников, М.А. Шабашова // Автомобильные дороги: Обзорная информация. / Информавтодор. – М. : 2000. – Вып. 2. – 54 с.
4. Изюмов, С.В. Теория и методы георадиолокации : учеб. пособие / С.В. Изюмов, С.В. Дручинин, А.С. Вознесенский. – М. : Горная книга ; Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2008. – 196 с.
5. Макеечева, И.В. Дорожный рентген. Георадиолокационные исследования при дорожном строительстве и диагностике состояния дорог / И.В. Макеечева // Строит. техника и технологии. – 2001. – № 5. – С. 38–39.
6. Кремнёв, А.П. Практическое применение георадарного зондирования в инженерно-геологической практике / А.П. Кремнёв, А.Н. Поляков // Геотехника Беларуси: наука и практика : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. – Минск : БНТУ, 2013. – Т. I. – С. 129–134.
7. Кремнёв, А.П. Георадарное зондирование при обследовании грунтовых насыпей / А.П. Кремнёв, А.Н. Поляков // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVIII междунар. науч.-метод. семинара : в 2 т. – Новополоцк : ПГУ, 2012. – Т. II. – С. 260–265.
8. Кремнёв, А.П. Георадиолокационный метод контроля качества устройства цементно-грунтовых и монолитных конструкций, устраиваемых в грунте / А.П. Кремнёв [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – № 16. – С. 34–39.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ  
СЕРПОВИДНОГО ПРОФИЛЯ С ЛЕГКИМИ БЕТОНАМИ

С.Д. Семенюк, Т.Н. Седляр,

Белорусско-Российский университет, Могилёв, Беларусь

email: Sedlyr\_TN@grsu.by

*Рассмотрена методика проведения экспериментальных исследований сцепления арматуры с легкими бетонами.*

*Ключевые слова: легкий бетон, кубы, призмы, бетоны, прочность, балки, сцепление арматуры.*

THE METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ADHESION  
OF SICKLE REINFORCEMENT PROFILE WITH LIGHT CONCRETE

S. Semenuk, T. Sedlyr

Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

email: Sedlyr\_TN@grsu.by

*The article deals with the methodology of experimental studies of reinforcement adhesion to lightweight concrete.*

*Keywords: lightweight concrete, cubes, prisms, concrete, durability, I-beam, clutch fittings.*

Применение легкого бетона значительно расширяется, так как ее использование эффективно не только для наружных ограждающих отапливаемых зданий, но и во всех случаях, когда необходимо уменьшить вес конструкции. Особое значение легкий бетон имеет для строительства зданий из крупных панелей и блоков, использование его существенно снижает трудоемкость, вес, стоимость сооружений. Комплексное использование легких бетонов позволяет решать проблемы энергоресурсосбережения при строительстве и техническом обслуживании зданий и инженерных сооружений, повышает их надежность, долговечность и безопасность при эксплуатации. Однако, для соответствия белорусских нормативных документов с ТКП EN 1992-1-1-2009\* «Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1»[1]необходимо уточнить некоторые прочностные характеристики легких бетонов, а также выявить анкеровку арматуры серповидного профиля в конструкциях из керамзитобетона, что актуально для Республики Беларусь.

Для этой цели необходимо провести испытание трех серий образцов, включающих в себя экспериментальные исследования керамзитобетона класса LC16/18,LC25/28,LC30/33 со значениями длины анкеровки в пяти вариантах для стержней класса S500 и диаметром 10, 12, 14 и 16мм. Подбор составов бетонной смеси производился согласно Рекомендаций РУП «БелНИИС» по подбору, изготовлению и применению конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитожелезобетонов [2]. Конструктивные схемы анкеровки экспериментальных образцов даны на рисунке 1.

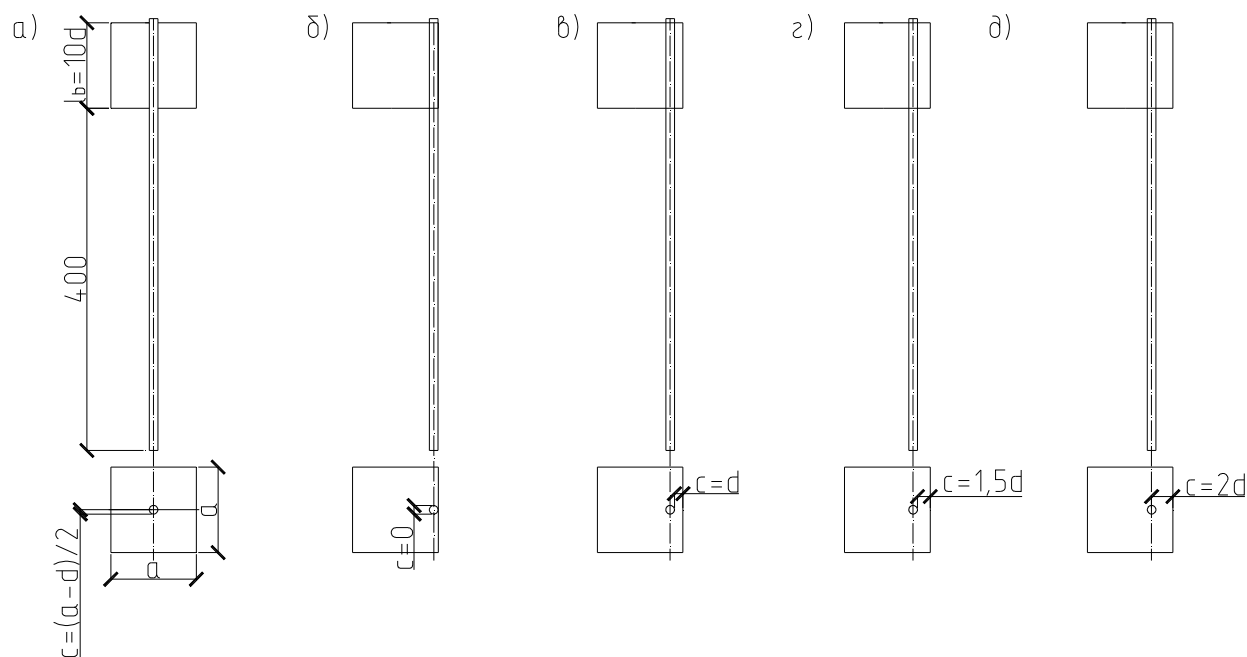


Рисунок 1. – Конструктивные схемы экспериментальных образцов ( $a = 150$  мм)

Призмы имеют поперечное сечение 150x150x600мм (6 шт. в серии), в которых будут размещаться стержни диаметром 10, 12, 16 мм. Длина анкеровки будет равна  $l_b = 10 \cdot d$ , или 100, 120, 140, 160 мм соответственно. Изготавливаются сразу по 2 образца. Вместе с призмами изготавливаются кубы с размерами ребра 150 мм (по 9 шт. в серии) и цилиндры  $\varnothing 150$  мм и высотой 300 мм (9 шт. в серии). Следует также обратить внимание, что для легких бетонов минимальную толщину защитного слоя следует увеличивать на 5% от величины защитного слоя для тяжелых бетонов.

Для приготовления экспериментальных образцов используются инвентарные сборно-разборные металлические формы. Уплотнение бетонной смеси при укладке осуществляется с помощью глубинного вибратора. А после распалубки хранится в естественных условиях. Испытание бетонных образцов будет проходить по стандартным методикам по ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». Испытание планируется провести на разрывной машине ИР 6055-500-0. Бетонный образец фиксируется при помощи свободных концов арматуры и закрепляется в неподвижном захвате разрывной машины (рис. 2).

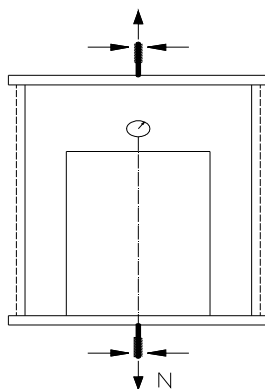


Рисунок 2. – Схема установки для испытания на вытягивание арматурных стержней из бетонных цилиндров

Продольные и радиальные деформации цилиндров определяются при помощи разработанных кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения» Белорусско-Российского университета приспособлений в виде кольцевых рамок (рис. 3) [3].

По фиксированным продольным и радиальным деформациям в керамзитобетонных цилиндрах будут вычисляться модули продольных, поперечных и сдвиговых деформаций, а также коэффициент Пуассона, пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования керамзитобетона.

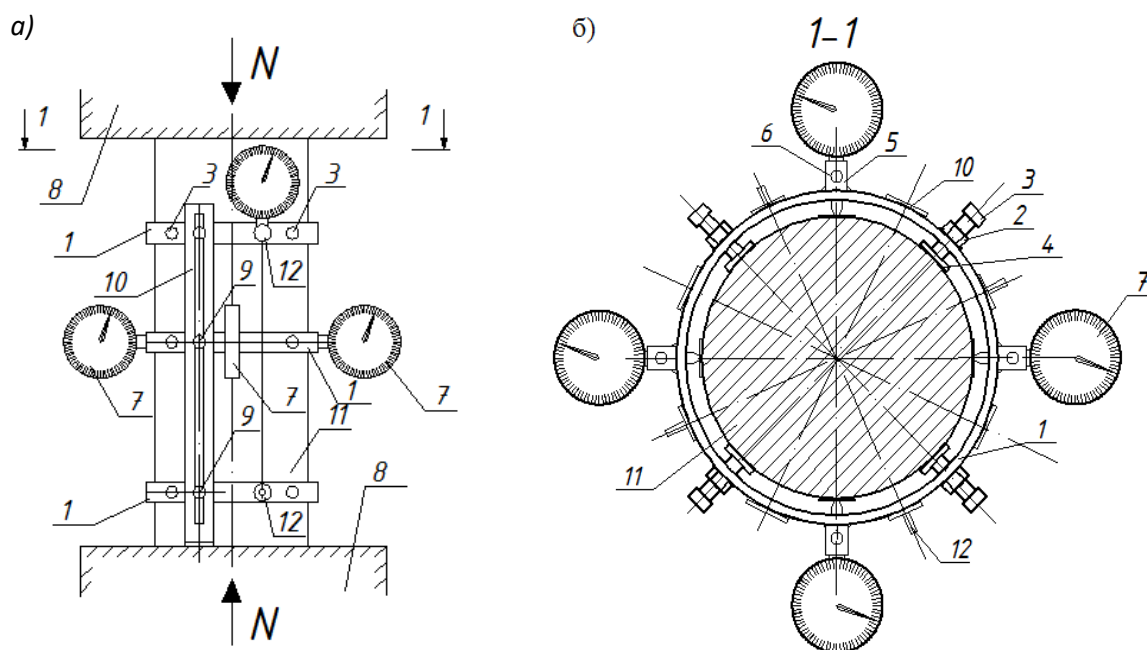


Рисунок 3. – Устройство для определения деформативных характеристик в бетонных цилиндрах: а – вид сбоку; б – разрез 1-1

Проведенные исследования будут способствовать разработке рекомендаций по проектированию безотказной совместной работы арматуры и бетона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Еврокод 2 Проектирование железобетонных конструкций Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1992 -1-1-2009. – Минск, 2010.
2. Рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных химическими и минеральными добавками конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов / РУП «Институт БелНИИС». – Минск, 2013. – 38 с.
3. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона : ГОСТ 24452-80. – Госкомитет СССР по делам строительства. – М., 1981. – 20 с.
4. Устройство для определения деформативных характеристик в бетонных цилиндрах : пат. РБ № 11289 / С. Д. Семенюк.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ С МОНОЛИТНЫМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ КАРКАСОМ

Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович

Белорусский национальный технический университет, Минск

email: snezhkov-d-u@yandex.by, snleonovich@yandex.ru

*Необходимый уровень безопасности, как на стадии возведения, так и в период эксплуатации высотного здания может быть обеспечен системой автоматизированного мониторинга деформационного состояния его несущих конструкций. В статье представлен опыт эксплуатации системы автоматизированного мониторинга высотного здания с использованием датчиков углов наклона несущих колонн. В качестве методической основы обработки данных мониторинга рассмотрен корреляционный анализ углов наклона колонн каркаса здания.*

*Ключевые слова: мониторинг, информационная сеть, инклинометр, несущий каркас, угловое отклонение, деформация, корреляция.*

## AUTOMATED MONITORING OF A HEIGHT BUILDING WITH A MONOLITHIC FERRO-CONCRETE FRAMEWORK

D. Snezhkov, S. Leonovich

Belarusian National Technical University, Minsk

email: snezhkov-d-u@yandex.by, snleonovich@yandex.ru

*The necessary level of safety, both at the stage of construction, and during building operation can be ensured by the automated monitoring system of stress-strain state of load-bearing structures. The article presents the experience of operating a system for automated monitoring of a high-rise building using inclination sensors of bearing columns. As a methodological basis for the processing of monitoring data, a correlation analysis of the slope angles of the building frame columns is proposed.*

*Keywords: monitoring, information network, inclinometer, load-bearing framework, angular deviation, deformation, correlation*

**Введение.** Наибольшую опасность при эксплуатации строительных объектов представляет собой процесс прогрессирующего обрушения конструкций [1], когда вплоть до катастрофического развития этого процесса явных внешних признаков потери несущей способности конструкции не наблюдается. Своевременно обнаружить начальную стадию такого рода событий возможно путем непрерывной регистрации деформационного состояния несущих конструкций, при соответствующей чувствительности измерительной системы. В мировой практике высотного строительства уже накоплен некоторый опыт эксплуатации информационно-измерительных систем автоматизированного мониторинга несущих конструкций. Несколько таких систем эксплуатируется в Республике Беларусь.

Первой задачей, с которой приходится сталкиваться при создании системы автоматизированного мониторинга, является сокращение перечня контролируемых параметров, который в значительной мере определяет её стоимость. Идеальным, конечно, было бы снабдить каждый элемент силового каркаса здания всем перечнем сенсоров. В реальности, конструктору приходится руководствоваться принципом разумной достаточности, ориен-

тируясь на диапазон рабочих нагрузок, вероятные техногенные и прочие факторы, а также характер использования помещений. Установка датчиков линейной деформации, независимо от физического принципа их работы, требует, как правило, достаточно протяженной базы, на которой производится регистрация взаимного перемещения контрольных точек конструкции [2], что может быть неприемлемым по архитектурным или эстетически соображениям. Сильная связанность элементов железобетонного монолитного каркаса здания в пределах каждого этажа и, соответственно, взаимная зависимость деформации элементов, позволяет минимизировать число контролируемых элементов каркаса. В качестве информационных параметров для оценки деформации несущего каркаса могут быть использованы только углы наклона нескольких ключевых конструкций каркаса. Типичные образцы датчиков угловых перемещений -инклинометров (см. рисунок 1), обеспечивают измерение углов своего наклона в двух ортогональных вертикальных плоскостях  $X$  и  $Y$  с погрешностью не превосходящей  $10^{-3}$  углового градуса. А компактность конструкции типовых моделей инклинометров в совокупности с беспроводным интерфейсом позволяют их легко устанавливать на элементах каркаса зданий находящихся в эксплуатации.

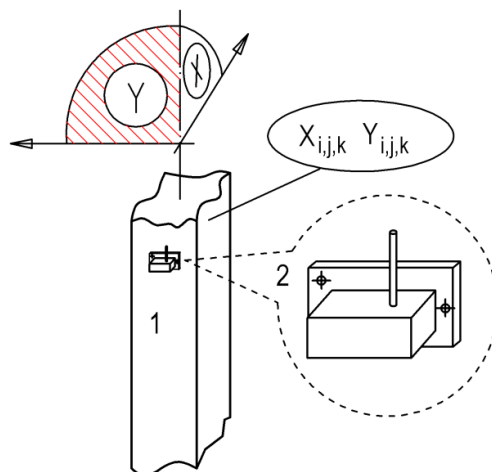


Рисунок 1. – Установка сенсора-инклинометра (2) на контролируемой колонне (1)

Другой важный вопрос, возникающий в начале эксплуатации системы автоматизированного мониторинга, – о предельных значениях контролируемых параметров. Отечественные нормативы -ТКП 45-3.02-108-2008, ТКП 45-1.01-234-2015 -дают лишь общие рекомендации (расстояние от верха фундамента до верха несущих конструкций покрытия  $h$ ) не должны превышать:

- при  $h$ , м до 150 включительно – 1/500;
- то же до 200 – 1/600.

При высоте  $h$  от 150 до 200 м значения предельных горизонтальных перемещений следует определять интерполяцией.

Какими могут быть отклонения показателей отдельных элементов или конструкций приходится решать проектировщику. Перспективу в решении указанной задачи может открыть технология информационного моделирования зданий (*Building Information Modelling – BIM*). Разработанная на стадии проектирования и дополняемая в процессе возведения и эксплуатации трехмерная информационная модель здания, где для каждого элемента модели закладываются сведения о его упруго-деформативных и прочностных параметрах, позволит по изменению состояния группы контролируемых элементов, рассчитать состояние остальных. Соответственно можно решать и обратную задачу – выбрать «ключевые» элементы, наиболее чувствительные к вероятным деформациям каркаса.



Таким образом, создание системы мониторинга включает в себя решение следующих задач:

- выбора ключевых контролируемых элементов каркаса здания, обладающих наибольшей чувствительностью к вероятным видам деформации каркаса;
- выбора аппаратной основы измерительной системы, в первую очередь - перечня используемых сенсоров;
- формирования алгоритма оценки деформации силового каркаса здания по данным измерений состояния ключевых элементов каркаса, и на его основе – распознавание *alarm* – ситуации, при которой требуется принятие оперативных решений.

**Технические средства системы мониторинга.** Системой автоматизированного мониторинга «АККЕ», производства компании «Tieto-Oskari Oy» (Финляндия), оснащено высотное здание с монолитным железобетонным каркасом - «Современный многофункциональный торгово-развлекательный комплекс с гостиницей и паркингом на проспекте Победителей в г. Минске». Комплекс представляет собой 21-этажное здание, состоящее из двух основных частей: шестизэтажной стилобатной части (торгового центра) и 14-этажной гостиницы. Верхняя отметка здания – +85,650 м. Основу несущего каркаса объекта составляли несущие монолитные колонны, диски монолитных перекрытий и элементы поперечной жесткости. Основными аппаратными элементами системы сбора информации являются двухосевые сенсоры-инклинометры и центральный базовый блок, связь между которыми организована по сетевому принципу. Основные параметры сенсоров-инклинометров приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные технические характеристики инклинометра CMS-2D-R

Наименование характеристики	Значение
Количество осей (каналов) измерения	2
Тип подключения	радиоканал
Полный измеряемый диапазон	$\pm 15^\circ$
Разрешающая способность, аналоговая	$0,001^\circ$ (3,6")
Абсолютная погрешность	$\pm 1,8''$
Диапазон измеряемых температур встроенным датчиком, $^\circ\text{C}$	от – 60 до + 125

Предусмотрены средства доступа к базовому блоку по выделенному каналу сети Internet. Контроль геометрических отклонений несущего каркаса производится сенсорами-инклинометрами имеющими беспроводной интерфейс, установленными на колоннах подвального, 7 и 21 этажах здания.

Дополнительно на кровле здания установлены проводные сенсор скорости и направления ветра и сенсор-акселерометр. Кроме датчика угловых перемещений каждый сенсор-инклинометр имеет в своем составе датчик температуры с разрешением  $0,1^\circ\text{C}$ . Обработка сигналов сенсоров происходит в режиме реального времени в центральном базовом блоке системы.

Автономный режим базового блока системы позволяет получать информацию от всех сенсоров, производя накопление данных с различным временным разрешением. Хранение данных мониторинга в базовом блоке производится на протяжении 20 лет непрерывного функционирования системы. В типовой настройке базового блока предусматривается организация массива накопленных данных сенсоров-инклинометров в виде трех файлов, содержащих отсчеты данных с разрешением в 1 сут, 1 ч и 15 мин. Размер каждого файла ограничен ~250 записями, каждая из которых является результатом усреднения отсчетов сенсоров за соответствующий интервал времени. Типовое расположение сенсоров – инкли-

нометров – на угловых колоннах несущего каркаса здания. Схемотехническое исполнение инклинометров и базового блока позволяет их дистанционное конфигурирование: установку параметров чувствительности сенсоров и их начального – нулевого значения отсчетов, периода опроса, параметров конфигурирования информационной сети и др.

Результаты мониторинга. В основе мониторинга конструкций лежит принцип регистрации угловых отклонений сенсора от нормального (первоначального) положения в режиме реального времени. Накопление данных от сенсоров-инклинометров, датчика скорости и направления ветра, и акселерометра осуществлялось в базовом блоке системы. Визуализация деформационных изменений состояния элементов несущего каркаса здания выполнялась путем построения годографов угловых перемещений колонн в полярных координатах, привязанных к выбранной приведенной системе координат  $X^*Y^*$ . Угловая координата  $ang$  годографа рассчитывалась по формуле

$$ang = arctg\left(\frac{x^*}{y^*}\right), \quad (1)$$

где  $x^*, y^*$  – значения угловой координаты каждого сенсора в приведенной системе. Расчет модулей  $mod$  углов каждого сенсора производился по формуле

$$mod = \sqrt{(x^*)^2 + (y^*)^2}. \quad (2)$$

На рисунке 2 приведены годографы перемещений сенсоров 7 и 21 этажей высотного здания в плоскости осей  $X^*, Y^*$ . За период наблюдений (19.08.2015 – 13.03.2018) средняя величина перемещений по этажам составила 0,007...0,025 углового градуса. Значимая корреляция средних значений угла наклона колонн по этажам не выявлена, что косвенно указывает на отсутствие наклонных перемещений всего здания целиком. Для уточнения наблюдаемой деформационной картины выполнен корреляционный анализ сигналов сенсоров в пределах отдельных этажей, а также оценка корреляции усредненных углов наклона между этажами, и определена корреляция угловых отклонений контролируемых элементов объекта с их температурой.

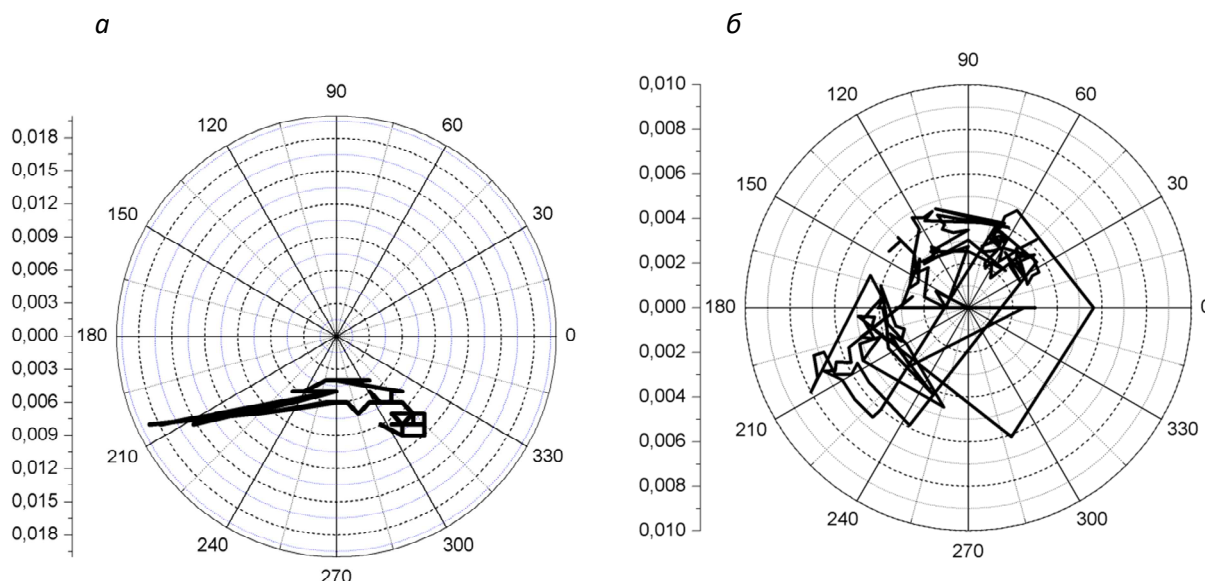


Рисунок 2. – Примеры годографов наклона колонн 7 (а) и 21 (б) этажей высотного здания а период с апреля 2017 г. по март 2018 г.

В таблице 2 приведены значения межэтажных коэффициентов взаимной корреляции средних значений модулей наклона и средних значений азимутов наклона колонн.

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции средних по этажам модулей векторов наклона колонн

Этажи	Коэффициент корреляции mod годографов	Коэффициенты корреляции азимутов годографов
21эт – 7эт	-0,22	-0,27
21эт - подвал	0,03	-0,05
7эт - подвал	0,52	-0,13

Результаты анализа показали (см. табл. 1), что взаимная корреляция среднего значения модулей углов наклона колонн этажей, за исключением этого показателя для 7 этажа и подвала, не является значимой. Корреляция азимутальных углов также практически отсутствует. Это косвенно указывает на отсутствие наклонных перемещений всего здания целиком. Годографы векторов деформации отдельных колонн (см. рис. 2) имеют стохастический характер и не выходят за пределы характерной устойчивой области, что также свидетельствует об отсутствии накопления деформаций вследствие усадочных процессов в элементах конструкций и фундаменте здания. Выявлена значимая корреляция угловых деформационных перемещений колонн от температуры. На рисунке 3 показаны совместные диаграммы изменений модуля угла наклона одной из колонн и температуры. Для датчиков высотной части здания устойчивое и близкое к 1 значение коэффициента корреляции наблюдалось в интервале температур  $+12...+32^{\circ}\text{C}$  (рис. 4). Для сенсоров подвальной части характерной температурой (рис. 5) явилось значение  $19...20^{\circ}\text{C}$ , при отклонении от которого коэффициент корреляции угла наклона и температуры менял знак.

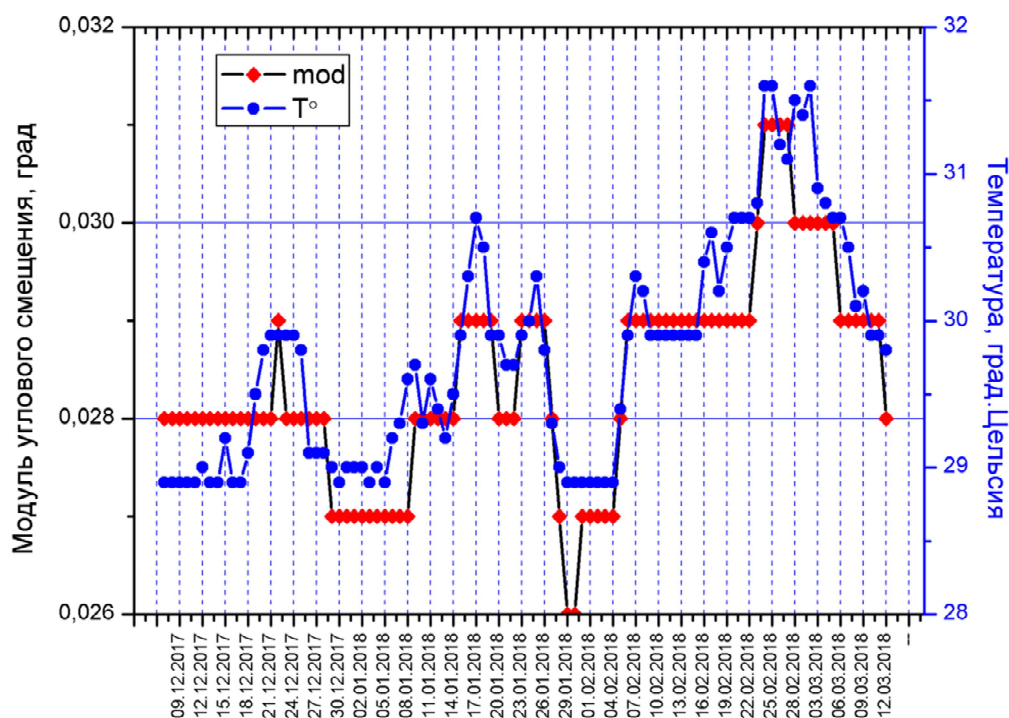


Рисунок 3. – Временные диаграммы угловых смещений сенсора подвала здания и его температуры за период декабрь 2017 г. – март 2018 г.

Динамика деформационных процессов представлена медленными – период колебаний порядка 3...6 сут – изменениями углов наклона контролируемых колонн с амплитудой не более  $0,001^\circ$ . Анализ данных с часовым и 15-минутным временным разрешением также не выявил высокочастотных процессов. Временные диаграммы имеют плавный характер без признаков динамических и ударных нагрузок.

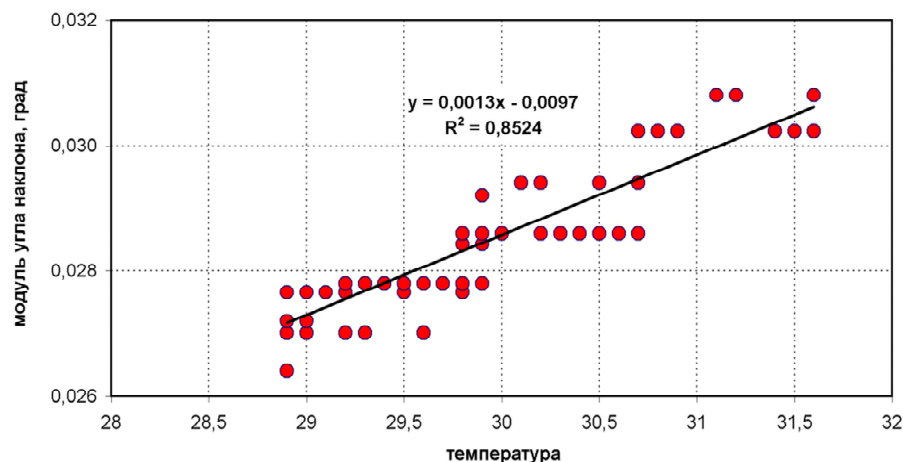


Рисунок 4. – Зависимость модуль угла наклона колонны ID-02 от температуры:  
коэффициент детерминации  $r^2 = 0,85$ ; коэффициент регрессии –  $0,0013$

Кроме измерений квазистатических деформационных эволюций каркаса здания, в системе мониторинга предусматривалась регистрация вибрационных ускорений. Запуск автоматической регистрации потока данных сенсора-акселерометра происходит по событию превышения сигналом любой из трех пространственных координат X, Y, Z значения  $1 \text{ mg} \approx 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ . После запуска происходит запись значений пространственных составляющих вектора ускорения с временным разрешением 30 мс. На рисунке 6 приведены временные диаграммы сигналов акселерометра, зарегистрированные 12.09.2017 в 9 ч 06 мин.

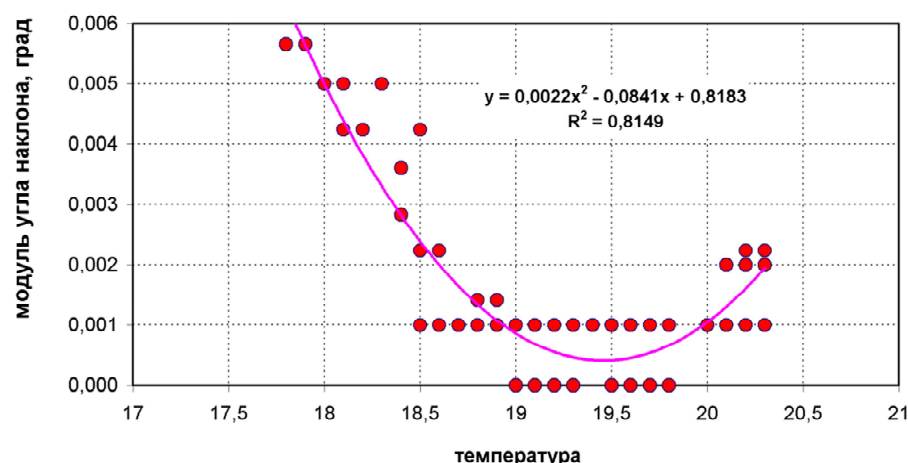


Рисунок 5. – Зависимость модуль угла наклона колонны ID-13 от температуры:  
коэффициент детерминации  $r^2 = 0,81$ ; коэффициент регрессии –  $-0,084$

Начальная часть сигнала, вызвавшая запуск регистрации, обусловлена, вероятно, однократной ударной нагрузкой. Установившийся сигнал акселерометра имеет квазипериодический характер с периодом порядка 90...100 мс, что обусловлено, вероятно, вибрацией технологического оборудования здания – лифтов, вентиляции и др. Амплитуда установившихся колебательных ускорений практически неизменна и сохраняет свое значение на

уровне 0,1...0,3 mg. Кроме указанного, других событий превышения вибрациями установленного порога не зарегистрировано.

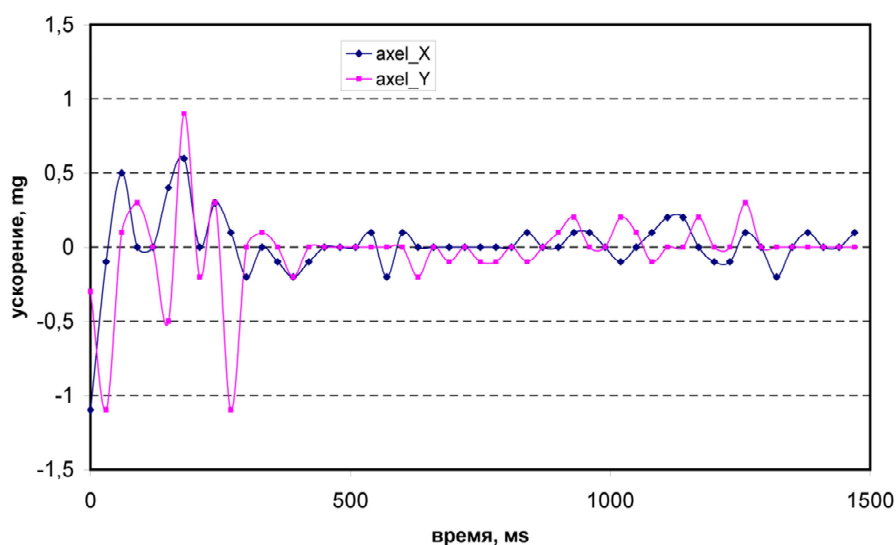


Рисунок 6. — Временные диаграммы пространственных составляющих вектора ускорения: регистрация 12.09.2017 в 09 ч 06 мин

Заключение. При возведении высотных (высотным является многоэтажное здание жилого назначения высотой от 75 до 100 м включительно, общественного и многофункционального назначения - высотой от 50 до 200 м включительно) и уникальных по архитектуре зданий зачастую становится проблематичным использовать несущие конструкции с большими запасами прочности, что при сочетании неблагоприятных факторов может увеличить риск их разрушения. С целью обеспечения необходимого уровня безопасности, как на стадии возведения, так и в период эксплуатации здания, важную роль приобретают системы автоматизированного мониторинга за деформационным состоянием несущих конструкций здания. Выполненные работы показали высокую эффективность использования инклинометров в качестве измерительной основы автоматизированной системы мониторинга несущего каркаса строительных объектов. Выявлено сильное влияние на показатели деформации элементов несущего каркаса здания температуры. Показатели чувствительности и долговременной стабильности метрологических характеристик инклинометров позволяют регистрировать практически любые деформационные изменения геометрии несущего каркаса здания, в том числе, обусловленные вариацией температуры. Данные мониторинга подтверждают статистическую обоснованность значений чувствительности сенсоров инклинометров — 0,001 углового градуса. В качестве методической основы обработки данных системы предлагается корреляционный анализ приращений углов наклона ключевых конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гурьев, В.В. Автоматизированные станции мониторинга деформационного состояния (СМДС) и их применение на строительных объектах / В.В. Гурьев [и др.] // Стройпрофиль. — 2009. — № 1 (71). — С. 3–6.
2. Информационные технологии в строительстве / В.Т. Минченя [и др.] // Актуальные проблемы инновационной подготовки инж. кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. / БНТУ. — Минск, 2015. — С. 174–180.
3. Снежков, Д.Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович. — Минск : БНТУ, 2016. — 330 с.

## К ВОПРОСУ О ЛИНЕАРИЗАЦИИ ЗАДАЧ УСТОЙЧИВОСТИ ФЕРМ

Л.С. Турищев

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: lst41@mail.ru

*Рассматривается вопрос правомерности геометрической линеаризации в задачах упругой устойчивости ферм согласно бифуркационной концепции. Теоретический аспект правомерности такой линеаризации рассматривается согласно положениям математической теории ветвления решений нелинейных уравнений. Количественная оценка учета влияния геометрической линеаризации на величины критических нагрузок проводится на примере фермы Мизеса.*

*Ключевые слова: линеаризация, упругая устойчивость, докритические деформации, теория ветвления, точки бифуркации, ферма Мизеса.*

## TO THE QUESTION OF LINEARIZATION THE STABILITY PROBLEMS OF TRUSSES

L. Turischev

Polotsk State University, Belarus

email: lst41@mail.ru

*The question of the validity of geometric linearization in problems of stability of trusses is considered in accordance with the bifurcation concept. The theoretical aspect of the validity of such a linearization is considered according to the provisions of the mathematical branching theory for solutions of nonlinear equations. Quantitative estimation of the influence of geometric linearization on the values of critical loads is carried out using the example of the Mises truss.*

*Keywords: linearization, elastic stability, subcritical deformations, branching theory, bifurcation points, Mises truss.*

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований было показано, что в ряде случаев в реальных фермах могут возникать существенные дополнительные напряжения, причиной которых является жесткое соединение стержней в узлах. Тем не менее, в целом исследования подтвердили возможность использования шарнирной расчетной схемы в обычном прочностном расчете. Однако следует учитывать, что в прочностном расчете шарнирная схема используется, как правило, на том этапе нагружения, который достаточно удален от критического состояния фермы.

На необходимость учета жесткого соединения стержней в узлах при исследовании устойчивости ферм было обращено внимание в работах С.Н. Никифорова [1], Н.К. Снитко [2], С.И. Вольвича [3], Н.Н. Раевского [4]. На основании этих работ были уточнены результаты исследования местной потери устойчивости в фермах, выполненные согласно шарнирной расчетной схеме.

В указанных выше работах исследование устойчивости ферм с учетом жесткого соединения стержней в узлах осуществлялось в геометрически линейной постановке. При получении уравнений, описывающих смежную форму равновесия фермы, как правило, ли-



неаризуется геометрическая сторона задачи по двум направлениям: не учитываются докритические деформации и перемещения и не учитывается нелинейный характер закритических деформаций и перемещений. Поэтому в качестве исследуемого состояния равновесия фермы принимается начальное, недеформированное безмоментное состояние.

В этом случае отыскание критических нагрузок фермы согласно разветвленческой концепции сводится к хорошо разработанной математической задаче об отыскании характеристических значений системы линейных однородных уравнений

$$\bar{x} = \mu B \bar{x}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – числовой параметра нагрузки;

$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – решение уравнения, которое зависит от параметра  $\mu$ ;

$B$  – некоторый линейный оператор системы уравнений (1).

Система (1) имеет тривиальное решение при всех значениях параметра  $\mu$ . Значения параметра, при которых появляются нетривиальные решения и являются характеристическими значениями уравнений (1). Считается, что при этих значениях возникают точки бифуркации форм равновесия фермы, а наименьшее характеристическое значение соответствует её критической нагрузке.

Однако отказ от линеаризации геометрической стороны задачи по двум указанным направлениям качественно изменяет характер исследуемого состояния равновесия фермы и, вследствие этого, математическую суть задачи. В этом случае исследуемым состоянием равновесия фермы является некоторое деформированное состояние, а задача отыскания критических нагрузок фермы сводится к математической задаче об отыскании точек ветвления решений системы нелинейных уравнений

$$F(\bar{x}, \mu) = 0. \quad (2)$$

Значения параметра  $\mu$ , при которых решения (1) разветвляются, и являются точками ветвления решений уравнений (2).

В случае отказа от линеаризации геометрической стороны задачи только по первому направлению система уравнений (2) принимает вид

$$\bar{x} = A(\bar{x}, \mu), \quad (3)$$

где  $A$  – некоторый нелинейный оператор системы уравнений (3).

Система (3) также имеет тривиальное решение при всех значениях параметра  $\mu$

$$A(\theta, \mu) = \theta.$$

Значения  $\mu$ , при котором появляются нетривиальные решения называются точками бифуркации решений уравнений (3).

Понятия точки ветвления решений уравнений (2) и точки бифуркации решений уравнений (3) перекликаются с понятием точки бифуркации форм равновесия фермы. В математической теории ветвления вопрос о допустимости перехода при решении некоторой нелинейной задачи от уравнений (2) к уравнениям (3), а от них к уравнениям (1) до конца не исследован. В строительной механике неявно подразумеваемым обоснованием допустимости таких переходов принято считать малость неучитываемых деформаций и перемещений и практическую приемлемость получаемых результатов.

Первым, кто сделал попытку обосновать правомерность линеаризации задач устойчивости, был Ф.С. Ясинский [5]. Он рассматривал частный случай бифуркационной задачи – задачу о продольном изгибе стержня, и им была сформулирована и доказана соответствующая теорема. Однако известные математики А.Ю. Ишлинский и М.Г. Крейн обратили внимание на неверность ее доказательства, а М.А. Красносельский в [6] доказал, что и сама линеаризация в бифуркационных задачах справедлива не всегда.

Поэтому представляет определенный интерес рассмотрение правомерности линеаризации в задачах устойчивости ферм с жесткими узлами на примере простейших ферменных систем. Примем в качестве такой системы ферму Мизеса с упруго податливым соединением стержней в узле (рис. 1).

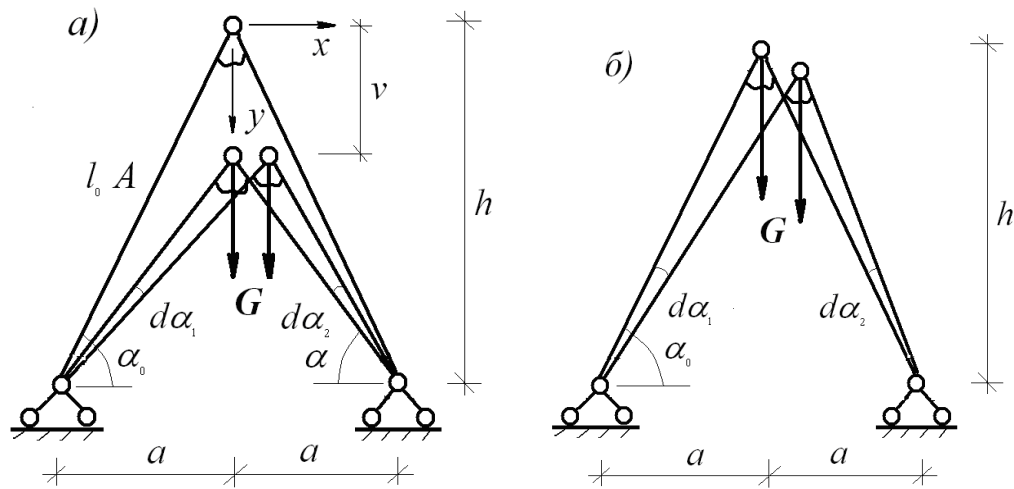


Рисунок 1. – Схемы деформирования фермы Мизеса

Для рассматриваемой фермы при учете докритического обжатия стержней исследуемое деформированное состояние равновесия моментное, так как в узле системы с упруго податливым соединением стержней возникает момент (нелинейная модель) (рис. 1, а). При неучете докритического обжатия характер исследуемого состояния равновесия меняется, и оно становится безмоментным (линейная модель) (рис. 1, б).

Первоначально исследуем устойчивость рассматриваемой системы с учетом геометрической нелинейности, порождаемой докритическим обжатием стержней (см. рис. 1, а). Поскольку в этом случае решаемая задача статически неопределимая, то составим три группы зависимостей:

1. Система уравнений равновесия

$$\begin{aligned} \sum y = 0; \quad N'_1 \sin \alpha_1 + N'_2 \sin \alpha_2 + Q'_1 \cos \alpha_1 + Q'_2 \cos \alpha_2 - G' &= 0; \\ \sum x = 0; \quad N'_1 \cos \alpha_1 - N'_2 \cos \alpha_2 - Q'_1 \sin \alpha_1 + Q'_2 \sin \alpha_2 &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $N'_i = \frac{N_i}{EA}$ ,  $Q'_i = \frac{Q_i}{EA}$  ( $i=1,2$ ) – безразмерные внутренние усилия в стержнях в деформированном состоянии системы;

$G' = \frac{G}{EA}$  – безразмерный параметр нагрузки.

## 2. Условия совместности деформаций

$$\begin{aligned} 2a \sin \alpha_2 &= l_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2); \\ 2a \sin \alpha_1 &= l_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2). \end{aligned} \quad (5)$$

3. Физические зависимости, связывающие внутренние усилия, возникающие в системе, с кинематическими величинами деформированного положения системы. В соответствии с законом Гука продольные силы описываются формулой

$$N'_i = \frac{l_0 - l_i}{l_0}. \quad (6)$$

Для момента, возникающего в упруго податливом узле системы, примем следующий закон связи с кинематическими величинами  $\alpha_0, \alpha$

$$M = c \sin(\alpha_0 - \alpha). \quad (7)$$

Здесь  $c$  - коэффициент жесткости в упруго податливом узле. Поперечная сила будет связана с кинематическими величинами  $\alpha_0, \alpha$  следующим соотношением

$$Q' = \frac{c}{l} \sin(\alpha_0 - \alpha). \quad (8)$$

Силовые и кинематические величины, описывающие смежное деформированное состояние в критическом состоянии системы, представим в виде

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \alpha + (-1)^i \Delta \alpha_i; \\ l_i &= l - (-1)^i \Delta l_i; \\ N'_i &= N' + (-1)^i \Delta N'_i; \\ Q'_i &= Q' - (-1)^i \Delta Q'_i. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь  $\alpha, l, N', Q'$  - соответственно, кинематические и силовые величины, характеризующие исследуемое деформированное состояние равновесия системы;  $\Delta \alpha_i, \Delta l_i, \Delta N'_i, \Delta Q'_i$  - соответственно, дополнительные кинематические и силовые величины, возникающие в смежном деформированном состоянии равновесия системы и характеризующие антисимметричную форму потери устойчивости нелинейной модели системы.

Подставляя (5) - (9) в первое уравнение равновесия системы (4), получим уравнение кривой равновесных состояний, соответствующее симметричной картине деформирования

$$G' = 2 \left[ \sin \alpha \left( 1 - \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \right) + \mu \frac{\cos^2 \alpha \sin(\alpha_0 - \alpha)}{\cos \alpha_0} \right], \quad (10)$$

где  $\mu = \frac{c}{l_0 EA}.$

Очертания кривых равновесных состояний при различных сочетаниях параметрах исследуемой системы  $\alpha_0, \mu$  приведены на рисунке 2

Использованная на графиках переменная величина  $\eta = \frac{v}{h}$  связана с величиной  $\alpha$  соотношением  $\eta = 1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha_0}.$

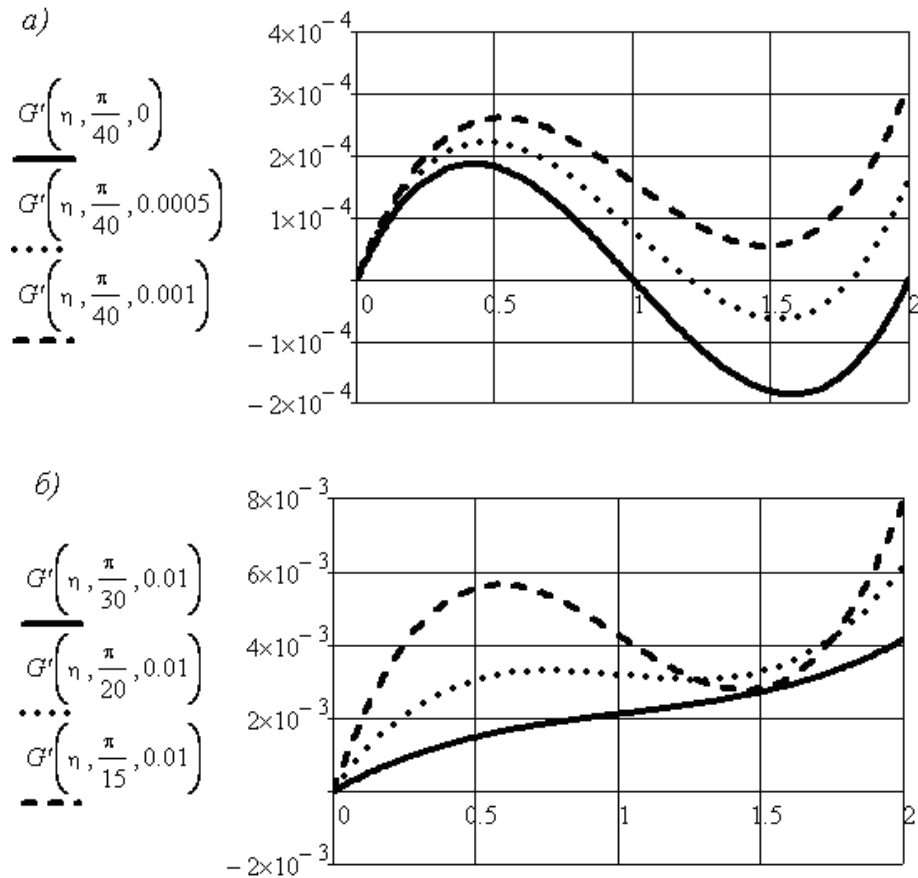


Рисунок 2. – Зависимость очертания кривой равновесных состояний нелинейной модели от параметров  $\alpha_0, \mu$

Продифференцировав (10) по  $\alpha$  и приравняв нулю производную, получим уравнение, определяющее положение предельных точек системы на кривой равновесных состояний, при достижении которых происходит симметричная форма потери устойчивости

$$\Phi(\alpha, \alpha_0, \mu) = 0, \quad (11)$$

где  $\Phi(\alpha, \alpha_0, \mu) = \cos \alpha_0 (\cos^3 \alpha - \cos \alpha_0) - \mu \cos^2 \alpha [\sin 2\alpha \sin(\alpha_0 - \alpha) + \cos^2 \alpha \cos(\alpha_0 - \alpha)]$ .

Графическое нахождение решений уравнения (11) при различных сочетаниях параметров  $\alpha_0, \mu$  приведено на рисунке 3.

Подставляя (5) - (9) во второе уравнение равновесия (4), получим уравнение, являющееся условием возникновения антисимметричной составляющей процесса деформирования системы и определяющее положение точек бифуркации на кривой равновесных состояний, при достижении которых происходит антисимметричная форма потери устойчивости

$$\Psi(\alpha, \alpha_0, \mu) = 0, \quad (12)$$

где  $\Psi(\alpha, \alpha_0, \mu) = (\sin^2 \alpha \cos \alpha - \cos \alpha_0) - \mu \sin^2 \cos^3 \alpha [3 + \operatorname{tg} \alpha_0 (\operatorname{tg} \alpha - 2 \operatorname{ctg} \alpha)]$ .

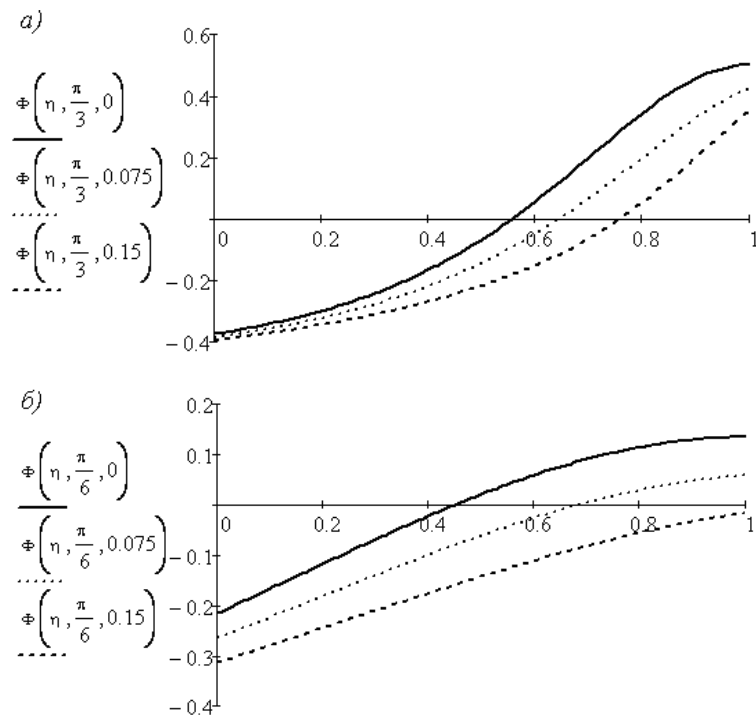


Рисунок 3. – Зависимость решений уравнения, связанного с отысканием предельных точек нелинейной модели, от параметров  $\alpha_0, \mu$

Графическое решение уравнения (12) при различных параметрах исследуемой системы  $\alpha_0, \mu$  приведено на рисунке 4.

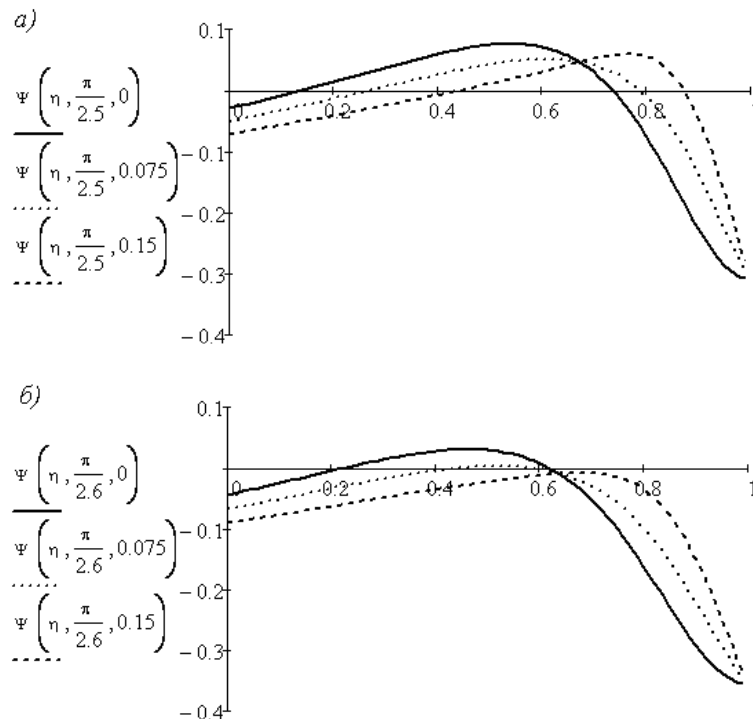


Рисунок 4. – Зависимость решений уравнения, связанного с отысканием точек бифуркации нелинейной модели, от параметров  $\alpha_0, \mu$

А теперь исследуем устойчивость фермы Мизеса с упруго податливым соединением стержней в узле без учета докритических продольных деформаций (см. рис. 1, б). В этом

случае исследуемое состояние равновесия безмоментное и для смежного положения системы справедливы следующие уравнения равновесия

$$\begin{aligned}\sum y = 0; \quad N'_1 \sin \alpha_1 + N'_2 \sin \alpha_2 + dQ'_1 \cos \alpha_1 + dQ'_2 \cos \alpha_2 - G' &= 0; \\ \sum x = 0; \quad N'_1 \cos \alpha_1 - N'_2 \cos \alpha_2 - dQ'_1 \sin \alpha_1 + dQ'_2 \sin \alpha_2 &= 0.\end{aligned}\quad (113)$$

Входящие в уравнения (10) кинематические и силовые величины представим в виде

$$\begin{aligned}\alpha_i &= \alpha_0 + (-1)^i d\alpha_i; \\ l_i &= l_0 - (-1)^i dl_i; \\ N'_i &= N'_0 + (-1)^i dN'_i,\end{aligned}\quad (14)$$

где  $N'_0 = \frac{G'}{2 \sin \alpha_0}$  – безразмерная продольная сила в стержнях исследуемого недеформированного состояния равновесия;

$d\alpha_i, dl_i, dN'_i$  – соответственно, кинематические и силовые бифуркационные величины.

Входящие в уравнения (14) бифуркационные силовые величины  $dQ_i$  связаны с изменениями углов  $d\alpha_i$  соотношениями

$$dQ'_i = (-1)^{i+1} \frac{c}{l_0} d\alpha_i. \quad (15)$$

Бифуркационные приращения продольных сил в соответствии с законом Гука описываются соотношениями

$$dN'_i = \frac{dl_i}{l_0}. \quad (16)$$

В свою очередь приращения длин  $dl_i$  связаны с изменениями углов  $d\alpha_i$  геометрическими соотношениями

$$\begin{aligned}dl_1 &= l_0 \left[ d\alpha_1 \operatorname{ctg} 2\alpha_0 + d\alpha_2 (\operatorname{ctg} \alpha_0 - \operatorname{ctg} 2\alpha_0) \right]; \\ dl_2 &= l_0 \left[ d\alpha_1 (\operatorname{ctg} \alpha_0 - \operatorname{ctg} 2\alpha_0) + d\alpha_2 \operatorname{ctg} 2\alpha_0 \right].\end{aligned}\quad (17)$$

Подставляя выражения (14) – (17) в уравнения (13) получим однородную систему линейных алгебраических уравнений относительно  $d\alpha_i$

$$\begin{aligned}[(\mu - N') - 1] d\alpha_1 + [(N' - \mu) + 1] d\alpha_2 &= 0; \\ [(N' - \mu) - \operatorname{ctg}^2 \alpha_0] d\alpha_1 + [(\mu - N') - \operatorname{ctg}^2 \alpha_0] d\alpha_2 &= 0.\end{aligned}\quad (18)$$

Приравнявая нулю определитель (15) получим квадратное уравнение относительно  $G'$ . Решая это уравнение, находим два значения критической нагрузки. Первое значение

$$G'_1 = 2 \frac{\sin^3 \alpha_0}{\cos^2 \alpha_0} (1 + \mu \operatorname{ctg}^2 \alpha_0), \quad (19)$$

соответствует симметричной форме потери устойчивости ( $d\alpha_1 = d\alpha; d\alpha_2 = -d\alpha$ ), т.е. предельной точке линейной модели системы. Второе значение

$$G'_2 = 2 \frac{\cos^2 \alpha_0}{\sin \alpha_0} (1 + \mu \operatorname{tg}^2 \alpha_0), \quad (20)$$



соответствует антисимметричной форме потери устойчивости ( $d\alpha_1 = d\alpha_2 = d\alpha$ ), т.е. точке бифуркации линейной модели системы.

Графики, характеризующие значения критических нагрузок фермы Мизеса с упруго податливым соединением стержней в узле, приведены на рисунке 5.

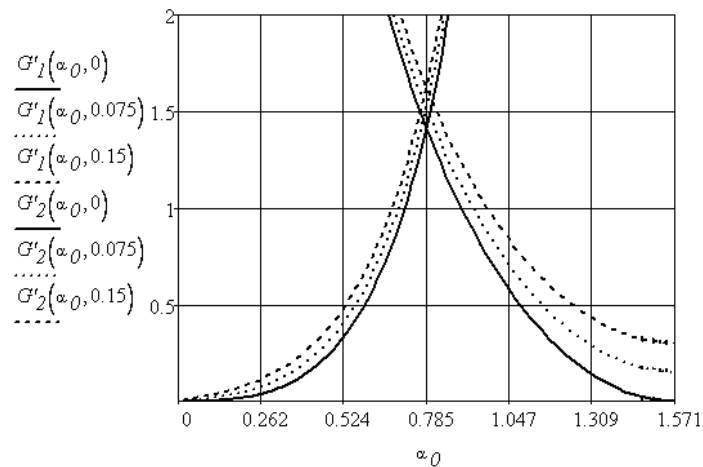


Рисунок 5. – Зависимость величин критических нагрузок линейной модели от параметров  $\alpha_0, \mu$

Из сравнения полученных результатов для линейно и нелинейной моделей фермы Мизеса с упруго податливым соединением стержней в узле следует, что учет докритических деформаций может приводить при определении критических нагрузок к качественно неверным результатам. Так при использовании линейной модели для исследования устойчивости фермы Мизеса симметричные и антисимметричные формы потери устойчивости могут возникать при любых сочетаниях её параметров  $\alpha_0, \mu$ . Однако проведенное исследование устойчивости той же фермы с использованием нелинейной модели показывает, что такой вывод неверен. При определенных сочетаниях параметров  $\alpha_0, \mu$  у неё могут отсутствовать как предельные точки (рис. 3, б), так и точки бифуркации (рис. 4, б).

Таким образом, вопрос о правомерности геометрической линеаризации в задачах упругой устойчивости ферм с жесткими узлами требует дальнейших исследований. Такие исследования должны установить строгие границы применимости не учёта докритических продольных деформаций в инженерных расчётах ферменных конструкций на устойчивость.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров, С.Н. Устойчивость сжатых стержней сварных ферм/ С.Н. Никифоров. – М. : Госиздат строительной литературы, 1938. – 83 с.
2. Снитко, Н.К. Расчет на прочность и устойчивость ферм с жесткими узлами/ Н.К. Снитко // Расчет на прочность, жесткость и устойчивость : сб. научн. ст. – М. : Машиностроение, 1955. – С. 158–163.
3. Вольвич, С.И. Устойчивость двухраскосных ферм с учетом жесткости узлов/ С.И. Вольвич, П.П. Смольков // Сб. науч. тр. / Саратовский автомобильно-дорожный институт. – Саратов, 1968. – С.87–93.
4. Раевский, Н.Н. Исследование устойчивости ферм с учетом жесткости узлов / Н.Н. Раевский // Сб. науч. тр. / Пензенский инженерно-строительный институт. – Пенза, 1970. – С. 112–116.
5. Ясинский, Ф.С. Избранные работы по устойчивости сжатых стержней. – Гостехтеориздат, 1934. – 427 с.
6. Красносельский, М.А. К задаче о точках бифуркации / М.А. Красносельский // Доклады Академии Наук СССР. – 1951. – Т. LXXIX, № 3. – С. 389–392.

## РАСЧЁТ СЖАТЫХ КАМЕННЫХ И АРМОКАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

А.М. Хаткевич

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.khatkevich@psu.by

*Рассматривается метод расчета параметров напряженно-деформированного состояния поперечных сечений сжатых каменных и армокаменных элементов, основанный на положениях общей деформационной модели. Предлагаемый метод позволяет осуществлять расчет сечений каменных элементов любой формы с любыми параметрами армирования, учитывая физическую нелинейность в виде диаграмм деформирования исходных материалов.*

*Ключевые слова: каменные и армокаменные элементы, сжатие, физическая нелинейность, деформационная модель.*

## CALCULATION OF COMPRESSION OF MASONRY AND REINFORCED MASONRY ELEMENTS TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NON-LINEARITY

A. Khatkevich

Polotsk State University, Belarus

email: a.khatkevich@psu.by

*The article considers a method for calculating the parameters of the stress-strain state of the normal to the longitudinal axis cross-sections of compressed masonry and reinforced masonry elements, based on the positions of the general deformed model. The proposed method makes it possible to calculate the cross-sections of masonry elements of any shape with any reinforcement parameters, taking into account the physical non-linearity in the form of deformation diagrams of the initial materials.*

*Keywords: masonry and reinforced masonry elements, compression, physical nonlinearity, the deformation model.*

**Введение.** Сжатые каменные и армокаменные элементы в виде столбов, простенков, фундаментов, пилонов и других конструкций, изготовленных из каменной кладки и арматуры, широко применяются в зданиях и сооружениях различного назначения.

Идеализация каменной кладки, применяемая для получения данных о напряженно-деформированном состоянии сжатых элементов и выполнения расчетов по предельным состояниям, отличается достаточно большим разнообразием. В то же время используемые модели можно свести в две группы. К *первой* группе относятся модели, в которых кладка представляет собой материал со сложной композитной структурой, состоящий из кладочных элементов, заключенных в растворную матрицу, при этом физико-механические характеристики камней и раствора резко отличаются между собой. Такие модели рассматривались в работах Н.К. Hilsdorf [1; 2], Pöschel и Sabha [3], В.В. Пангаева [4] и других. Расчет можно также выполнять с применением метода конечных элементов, что пока не получило широкого распространения для практических целей из-за необходимости введения большого количества исходных данных (конечных элементов), сложности описания их взаимодействия в зоне контакта, необходимости наличия специализированного программного обеспечения и т.п. К тому же к недостаткам моделей первой группы следует отнести невозможность учета многих случайных факторов, таких как: изменчивость геометрии кирпича и толщины швов, неплотность заполнения, усадка раствора в швах и другие технологические особенности.

В случае рассмотрения реальных каменных и армокаменных элементов, когда чередующиеся объемы однородного вещества значительно меньше размеров самой конструкции, для расчета ее напряженно-деформированного состояния *во второй группе* методов применяется метод сечений с гомогенизацией (заменой неоднородной структуры каменной кладки на однородную изотропную либо анизотропную с осредненными физико-механическими характеристиками). Физико-механические характеристики зависят от многих факторов (характера и направления приложения усилий, технологических особенностей каменной кладки, свойств материалов) и устанавливаются опытным путем либо по аналитическим зависимостям, построенным по результатам физического эксперимента. Практика проектирования и эксплуатации зданий и сооружений подтверждает обоснованность применения такого подхода. Определение обобщенных характеристик кладки было выполнено рядом советских ученых, созданы нормы проектирования. Вначале были разработаны положения расчета каменных элементов по допускаемым напряжениям, а позже переработаны в метод расчета по разрушающим усилиям и предельным состояниям. В направлении разработки критериев разрушения кладки как однородного материала, в том числе и с учетом диаграмм деформирования, известны работы Г.Г. Кашеваровой [5; 6], Г.А. Гениева [7; 8], A.W. Page [9], V. Lishak [10] и других.

**Методика расчета сопротивления сжатию с учетом физической нелинейности.** В [11–14] при расчете сжатых элементов каменная кладка рассматривается как однородный с осредненными физико-механическими характеристиками материал. Применяя метод сечений, сопротивление, соответствующее прочности каменного элемента в предельной стадии, находится из уравнений равновесия внутренних и внешних усилий. При этом фактически криволинейная эпюра напряжения в сжатой зоне сечения (рисунок 1, а) в предельной стадии заменяется на укороченную прямоугольную (рисунок 1, б, в). Упрощение в виде замены в расчетах криволинейной эпюры вызвано отсутствием методики, позволяющей учесть фактическое распределение напряжений.

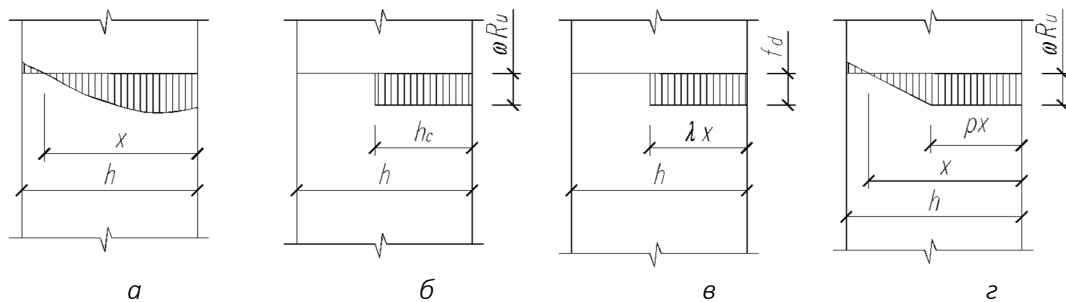


Рисунок 1. – Распределение нормальных напряжений в поперечном сечении:  
Фактическое (а); по [11, 12] (б); по [13, 14] (в); по [15] (г)

На рисунке 1 введены следующие обозначения:  $h$  – высота сечения в плоскости эксцентриситета;  $x$  – фактическая высота сжатой зоны;  $h_c$  – высота сжатой зоны сечения по [11; 12];  $\lambda x$  – высота сжатой зоны сечения по [13, 14];  $p$  – число пластичности;  $R_u$  – предел прочности кладки;  $w$  – коэффициент, учитывающий величину эксцентриситета;  $f_d$  – сопротивление кладки сжатию по [13, 14].

Сущность методики заключается в рассмотрении сечения сжатого каменного или армокаменного элемента в виде совокупности  $k$  элементарных площадок с площадью  $A_{mi}$ , и  $n$  продольных стержней с площадью  $A_{sj}$  (рис. 2) в пределах которых деформации считаются равномерно распределенными.



механическими характеристиками, учет которых в настоящее время основан на применении эмпирических правил и коэффициентов.

Так, например, прочность кладки в комплексных элементах с железобетоном уменьшается введением постоянного, не зависящего от объемного соотношения кладки и железобетона, коэффициента 0,85; в комплексных и внецентренно сжатых армокаменных элементах вводятся ограничения по проценту продольного армирования, к расчетному сопротивлению арматуры вводятся коэффициенты условий работы. Указанные мероприятия необходимы для учета неполного использования прочностных свойств кладки и арматуры, вызванного разными деформационными свойствами составляющих сечение сжатого элемента материалов. К тому же существующие методики расчета рассматривают лишь одну стадию работы – стадию разрушения, не позволяя оценить напряженно-деформированное состояние сжатых элементов на других стадиях.

На рисунках 3 и 4 в качестве примера показаны отдельные результаты расчета сопротивления сжатию сечений элементов из каменной кладки с продольным армированием и комплексных элементов из кладки с железобетонным сердечником. Предлагаемая методика, учитывающая истинные деформационные свойства составляющих сечение материалов, позволяет выявить неполное использование прочностных свойств арматуры, каменной кладки и проводить расчеты без введения эмпирических коэффициентов. В частности, напряжения в арматуре в предельной стадии по прочности составили для внецентренно сжатого и комплексного элемента при превышении процента армирования 184 МПа (при пределе текучести 283 МПа) и 238 МПа (при пределе текучести 360 МПа) соответственно; в комплексном элементе из-за большей деформативности напряжения в каменной кладке составили 3,8 МПа при пределе прочности 4,2 МПа.

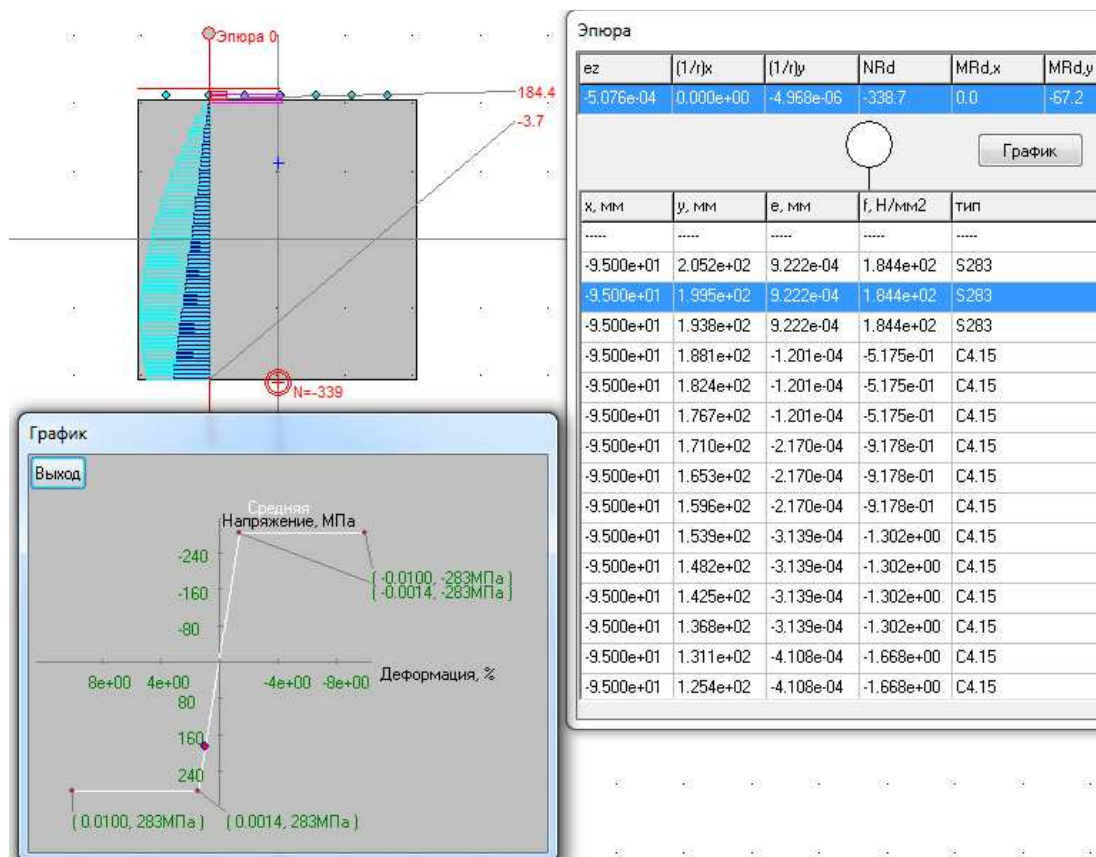


Рисунок 3. – Распределение напряжений в поперечном сечении сжатого армокаменного с продольным армированием элемента, напряжения в продольной арматуре в предельной стадии по прочности

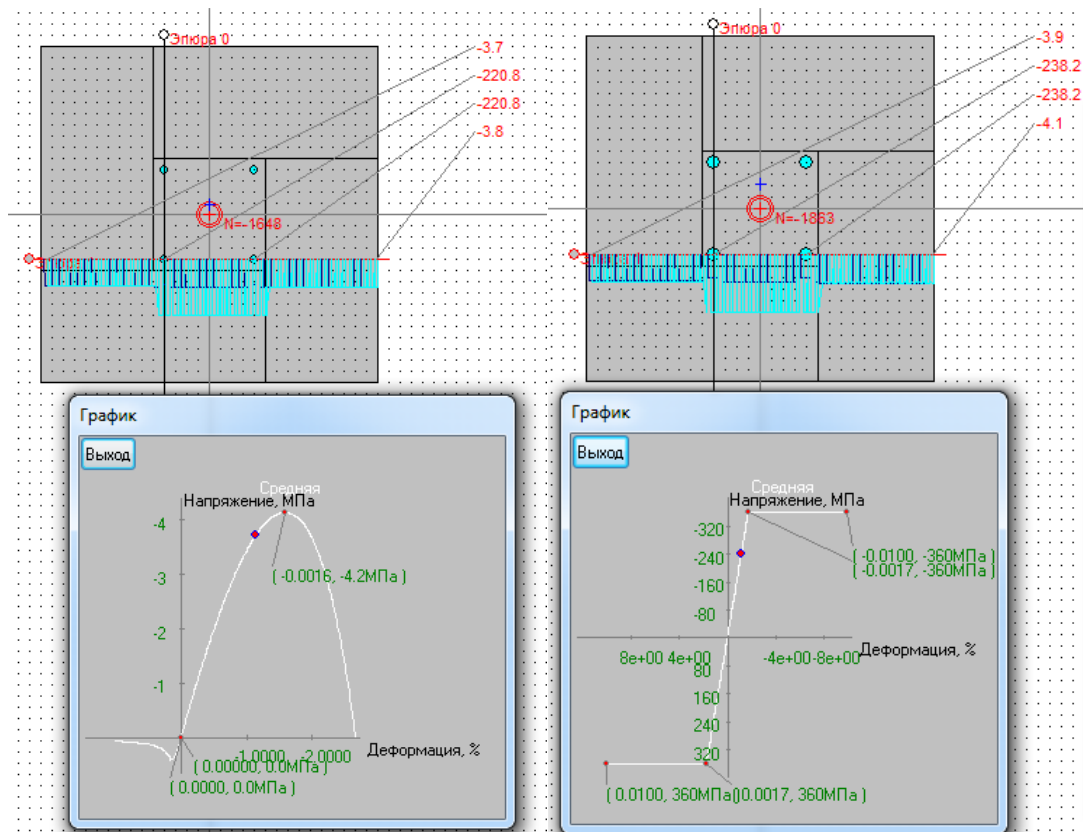


Рисунок 4. – Распределение напряжений в сечениях сжатых комплексных элементов, напряжения в кирпичной кладке и продольной арматуре в предельной стадии по прочности

**Закключение.** Методика расчета сопротивления сжатию, основанная на положениях общей деформационной модели, позволяет определять параметры напряженно-деформированного состояния нормальных к продольной оси сечений каменных и армокаменных элементов на любом этапе нагружения, учитывая при этом физическую нелинейность деформирования исходных материалов в виде каменной кладки, арматуры, бетона и др. За критерий разрушения в предельной стадии рекомендуется принимать максимальное усилие от внешней нагрузки, при котором сходятся уравнения равновесия, благодаря чему исключается необходимость нормирования параметра предельной сжимаемости, появляется возможность учета полного перераспределения усилий в сечении каменных и армокаменных элементов, состоящих из двух и более материалов с различными физико-механическими характеристиками, в т.ч. усиленных в процессе эксплуатации

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hilsdorf, H.K. Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression / H.K. Hilsdorf // Designing, engineering and constructing with masonry products. Gulf Publishing Company. – 1969. – P. 34–41.
2. Flohrer, C. Strength and Deformation Characteristics of Masonry with Fiber Reinforced Mortar Joints / C. Flohrer, H.K. Hilsdorf // Proceedings of the Fifth International Brick Masonry Conference, Washington, D.C., U.S.A., October 5–10, 1979 / Brick Institute of America; Advisors : C.T. Grimm [et al.]. – Washington, 1979. – P. 155–162.
3. Pöschel, G. Ein theoretisches Modell zum Tragverhalten von Elbsandsteinmauerwerk / G. Pöschel, A. Sabha // In: Wenzel F. (ed.) Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. – 1996. – SFB 315. – P. 111–118.



4. Пангаев, В.В. Развитие расчетно-экспериментальных методов исследования прочности кладки каменных конструкций : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / В.В. Пангаев ; Новосиб. гос. архитектурно-строительный ун-т (Сибстрин). – Новосибирск, 2009. – 35 с.
5. Кашеварова, Г.Г. Натурные и численные эксперименты, направленные на построение зависимости напряжения от деформации кирпичной кладки / Г.Г. Кашеварова, М.Л. Иванов // Приволж. науч. вестн. – 2012. – № 8 (12). – С. 10–15.
6. Кашеварова, Г.Г. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки / Г.Г. Кашеварова, А.Ю. Зобачева // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1. – С. 106–116.
7. Гениев, Г.А. О критериях прочности ортотропного материала типа каменной кладки при плоском напряженном состоянии / Г.А. Гениев, А.Н. Воронов // Труды ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Исследование и методы расчета строительных конструкций. – 1985. – С. 94–101.
8. Гениев, Г.А. О критерии прочности каменной кладки при плоском напряженном состоянии / Г.А. Гениев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1979. – № 2. – С. 7–11.
9. Page, A.W. The biaxial compressive strength of brick masonry / A.W. Page // Proceedings of Institution of Civil Engineers, Part 2. – 1981. – Vol. 71, Sept. – P. 893–906.
10. Lishak, V.I. 2-D Orthotropic failure criteria for masonry / V.I. Lishak, V.I. Yagust, D.Z. Yankelevsky // Engineering Structures. – 2007. – № 36. – P. 360–371.
11. Каменные и армокаменные конструкции : СНиП II-22-81\*. – Введ. 31.11.81. – М. : Стройиздат, 1983. – 40 с.
12. Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП II-22-81) : утв. 15.08.1985. – М. : (ЦИТП) Госстроя СССР, 1989. – 149 с.
13. Еврокод 6. Проектирование каменных конструкций. Ч. 1-1 : Общие правила для армированных и неармированных конструкций : СТБ EN 1996-1-1-2008. – Введ. 1.07.2009. – Минск : Госстандарт, 2009. – 128 с.
14. Каменные и армокаменные конструкции. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-5.03-308-2017 (33020). – Введ. 01.01.2018. – Минск : Минстройархитектуры, 2017. – 112 с.
15. Беленцов, Ю.А. Усиление каменных стен и простенков с учетом упругопластической работы каменной кладки реконструируемых жилых зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Ю.А. Беленцов ; Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – СПб., 2001. – 24 с.
16. Хаткевич, А.М. Метод расчета прочности нормальных к продольной оси сечений конструкций из каменной кладки с учетом диаграмм деформирования / А.М. Хаткевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 8. – С. 45–53.
17. Глухов, Д.О. Метод расчета прочности сжатых каменных элементов по сечениям, нормальным к продольной оси / Д.О. Глухов, А.М. Хаткевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 8. – С. 73–79.
18. Лазовский, Д.Н. Расчет сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов с учетом физической нелинейности / Д.Н. Лазовский, А.М. Хаткевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. – 2017. – № 16. – С. 41–50.

## РАСЧЕТ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ

Б.Н. Ягнюк

Петрозаводский государственный университет, Россия  
email: yagnyuk@petrsu.ru

*Вопросы изучения международных стандартов с целью их адаптации в условиях России и продвижения отечественных технологий на мировой и европейский рынок в настоящее время являются своевременными, важными и актуальными. В статье рассматриваются вопросы, связанные с повышением устойчивости стальных каркасов зданий различного назначения в аварийных ситуациях, которые в нашей стране, в последнее время, происходят достаточно часто. В статье показано, как эти вопросы решаются в европейских документах по проектированию (Еврокодах), делаются предложения по включению в национальные нормы аналогичных требований. Приводятся результаты расчета каркаса по методу умозрительного удаления колонны.*

*Ключевые слова: аварийные воздействия, обрушения, стальные конструкции, повышение надежности, нормы Евросоюза, устойчивость зданий.*

## DESIGN OF BUILDING FRAMEWORKS FOR DISPROPORTIONAL COLLAPS

B. Yagnyuk

Petrozavodsk State University, Russia  
email: yagnyuk@petrsu.ru

*Nowadays, the study of international standards is considered as important and urgent in terms of their adjustment to Russian condition and promotion of Russian technologies in the world and European markets. The article deals with issues related to the increase of stability of steel structures of various buildings emergency situations, which have occurred rather frequently in our country in recent years. The article shows how these issues are addressed in the European documents on structural design (Eurocodes), how statements on inclusion of similar requirements into national standards are made. The results of the design example based on the method of column notional removal are presented.*

*Keywords: accidental action, collapse, steel structures, reliability improvement, European standards, building sustainability.*

Обрушение конструкций зданий вследствие взрыва бытового газа или баллонов, используемых при ремонтах и других действиях внутри помещений, в настоящее время приобрело в нашей стране достаточно широкое распространение.

Характер обрушения имеет достаточно типичную картину вне зависимости от конструкций здания (железобетонных или стальных): взрывное воздействие на стеновые панели срывает с мест перекрытия, ригели перекрытий, которые падают на нижележащие аналогичные конструкции, передавая на них мощное динамическое воздействие и вызывают прогрессирующее обрушение на всех этажах данного блока здания.

Постановлением Правительства Российской Федерации от 26 декабря 2014 г. № 1521 утвержден перечень национальных стандартов и сводов правил, в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», которое

вступило в силу с 1 июля 2015 г. В число таких документов входят ГОСТ Р 54257-2010 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования» в виде отдельных разделов и целый ряд Сводов правил (Актуализированных редакций СНиП), включая СП 20, СП 16, СП 63.

В соответствие со стандартом ГОСТ Р 54257-2010 п. 5.1 нагрузки, действующие на здания, будут относиться к аварийным, если они создают аварийные ситуации с возможными катастрофическими последствиями. Однако в примечании к этому пункту записано, что «к аварийным воздействиям относятся воздействия, которые не заданы в нормативных документах», следовательно, мы не знаем величины нагрузок, на которые необходимо вести расчет.

С аналогичными проблемами столкнулись наши коллеги из Великобритании, когда 16 мая 1968 года произошло известное обрушение одной из секций 22-х этажного жилого здания в результате взрыва бытового газа в квартире на 18 этаже [1]. Ограждающие конструкции здания были выполнены в виде сборных панелей, соединенных друг с другом без конструктивной рамы. В конструкции каркаса здания не было организовано какого-либо другого пути для передачи на фундаменты возникающих вследствие аварийной ситуации усилий. После этого события целый ряд зарубежных стран внесли изменения в национальные нормы строительного проектирования для обеспечения конструкционной целостности и повышения надежности зданий в аналогичных ситуациях.

В нашей статье мы рассмотрим, как эти вопросы решаются в стандартах Евросоюза для зданий со стальным каркасом из горячекатаных элементов и сделаем соответствующие рекомендации, которые помогут снизить аварийность в процессе эксплуатации аналогичных зданий при аварийных воздействиях.

### Классификация

В составе Строительных правил Великобритании разработан и используется Утвержденный документ А (*Approved Document A*) [2], устанавливающий различные требования к зданиям разных типов и размеров, подразделенных на классы. Таких классов в документе 4: 1; 2A; 2B; 3.

Основные требования к зданиям, которые приводятся в этом документе следующие:

Для зданий класса 1:

При условии, что здания запроектированы в соответствии с правилами, приведенными в Утвержденном документе А для нормальной их эксплуатации, никаких дополнительных мер повышения устойчивости не требуется.

Для зданий класса 2A:

Здания должны быть снабжены эффективной системой горизонтальных связей.

Для зданий класса 2B:

Повышение устойчивости зданий достигается одним из трех методов, приведенных ниже:

1. Здания должны быть снабжены эффективными системами горизонтальных и вертикальных связей для всех несущих колонн.

2. Необходимо выполнять проверку подтверждающую, что при отказе колонны или балки, поддерживающей одну или более колонн (по одной на каждом этаже одновременно), здание остается устойчивым и что площадь возможного разрушения перекрытия на любом этаже не превышает меньшей величины из двух: 15% всей площади перекрытия или 100 м<sup>2</sup>. При этом разрушение не должно распространяться на другие этажи.

3. Если при отказе колонн (или балок поддерживающих одну или несколько колонн) происходит разрушение, превышающее приведенные выше величины, тогда такие элементы должны проектироваться как «ключевые элементы», которые самостоятельно способны воспринимать комплекс горизонтальных и вертикальных нагрузок.

Для зданий класса 3:

Необходимо проводить систематическую оценку риска, принимая во внимание обычные эксплуатационные ситуации, которые возможно предвидеть, и ситуации критические, возникающие в особых случаях. Критические ситуации должны быть смоделированы и систематизированы как возможные ситуации при эксплуатации здания.

#### **Характеристики классов**

В Приложении А к Еврокоду (EN1991-1-7) [3] приводится метод отнесения здания к одному из четырех классов. Основными признаками отнесения здания к соответствующему классу являются его тип, использование и размеры. Классификация основана на принятии упрощенной модели системы классификации, основанной на риске отказа конструкции. Классы лишь частично учитывают размеры здания, они в большей степени принимают во внимание назначение здания и социально-экономические последствия отказа. Так, больницы и школы попадают в более высокие классы, чем здания другого назначения такого же размера. Подход, основанный на рисках, предусматривает определение коэффициента риска, базирующегося на следующих переменных:

- Количество людей в здании в период критической ситуации;
- Расположение здания и его высота;
- Восприятие обществом разрушения здания в процессе его эксплуатации;
- Вид воздействия и возможность его появления в то время, когда в здании или около него находится много людей;
- Конструктивная схема здания и виды материалов его составляющих.

Для зданий, которые будут использоваться по нескольким назначениям, выбирается тип более строгой классификации из всех возможных. При определении количества этажей, цокольные могут не учитываться при условии, что они соответствуют требованиям класса 2b (верхняя группа риска).

#### **Примеры зданий, относящихся к разным классам**

Здания класса 1 характеризуются невысокой вероятностью отказа. К таким зданиям относятся:

- Жилые здания с квартирами для одиночек, не превышающие 4 этажа;
- Сельскохозяйственные здания;
- Здания, редко посещаемые людьми при условии, что ни одна из частей здания не ближе к другому зданию или участку, где наблюдается скопление людей, менее 1,5 его высоты.

Здания класса 2a (группа низкого риска) характеризуются средней степенью вероятности отказа. К таким зданиям относятся:

- Жилые здания с квартирами для одиночек высотой в 5 этажей;
- Гостиницы, не превышающие 4 этажей;
- Квартирные дома, апартаменты семейного проживания и другие здания аналогичного назначения, не превышающие 4-х этажей;
- Здания офисов, не превышающие 4-х этажей;
- Производственные здания, не превышающие 3-х этажей;
- Сдаваемые помещения, не превышающие 3-х этажей с площадью каждого этажа менее 1000 м<sup>2</sup>;
- Одноэтажные здания образовательного назначения;
- Все здания, не превышающие двух этажей, посещаемые публикой, с площадью каждого этажа до 2000 м<sup>2</sup>.

Здания класса 2b (группа высокого риска) характеризуются средней степенью вероятности отказа. К таким зданиям относятся:

Отели, квартирные дома, апартаменты и другие жилые здания высотой более 4, но не более 15 этажей;

Здания образовательного сектора высотой более одного, но не превышающие 15 этажей;

Сдаваемые в аренду здания высотой более 3-х, но не более 15 этажей;

Больницы, не превышающие 3-х этажей;

Офисы высотой более 4-х, но не более 15 этажей;

Все здания, посещаемые публикой, с площадью каждого этажа более 2000 м<sup>2</sup>, но не превышающего 5000 м<sup>2</sup>;

Стоянки автомобильного транспорта высотой не более 6 этажей.

Здания класса 3 характеризуются высокой степенью вероятности отказа. К таким зданиям относятся:

Все здания, приведенные выше и отнесенные к классу 2, превышающие их по площади или количеству этажей;

Все здания, посещаемые публикой большей площади, чем для класса 2;

Стадионы, принимающие более 5000 зрителей;

Здания, с нахождением в них опасных веществ и/или процессов их производства.

### **Системы горизонтальных связей в зданиях со стальным каркасом**

Горизонтальные связи повышают устойчивость конструкции в аварийных ситуациях, выполняя следующие функции:

Не позволяют происходить «цепной реакции» при обрушении;

Удерживают колонны каркаса на своих местах.

Принципиальный результат устройства горизонтальных связей состоит в создании балочной несущей системы над разрушенным пространством каркаса. Устройство горизонтальных связей, может быть выполнено по правилам Еврокода (EN 1993) [4], но в нем, к сожалению, нет информации о необходимой пластичности стыков между колоннами или их жесткости.

Правила повышения устойчивости здания в критических ситуациях не подразумевают полное описание всех вопросов поведения конструкций, но дают возможность создавать конструкции, адекватно работающие в критических ситуациях. Применяя эти правила, можно создать необходимое закрепление над той зоной нижележащего перекрытия, которую поддерживала отказавшая колонна.

Как было отмечено выше, горизонтальные связи также удерживают колонны каркаса на своих местах и воспринимают усилия, которые появились бы в их сечениях при аварийных ситуациях. Создавая систему связей, которая способна воспринимать растягивающие усилия, возникающие в соединениях колонн с балками, мы добиваемся сохранения позиций колонн на их местах и продолжения их работы по восприятию вертикальных нагрузок.

Критические ситуации часто рассматриваются как взрыв, происходящий внутри здания, но подобные воздействия аналогичны любой другой критической ситуации, вызывающей растягивающие силы в балочных конструкциях. Удержание колонн на своих местах является важным моментом еще и потому, что позволяет балкам оставаться на своих местах и поддерживать перекрытия, которые, в противном случае, рухнули бы вниз.

### **Расчетные усилия**

В отечественных нормативных документах мы не найдем ни величины усилий, на которые необходимо выполнять расчет, ни указаний на необходимость его выполнения для горизонтальных элементов и узлов сопряжения балок с колоннами на горизонтальные нагрузки. Обращаясь к Еврокоду (EN1991-1-7) [3], мы можем найти следующие рекомендации.

Для зданий класса 1 выполнение расчета не требуется и значения усилий не приводятся.

Для зданий класса 2а в Еврокоде [3] приведены рекомендации, сводящиеся к тому, что каждый связевой элемент, включая его соединения со стойками, должен рассчитываться на восприятие горизонтальной силы  $T_i$  – для внутренних связевых элементов и  $T_p$  – для связевых элементов, размещенных по периметру здания. Величины усилий  $T_i$  и  $T_p$  определяются по формулам (A1) и (A2), приведенным в Еврокоде (EN1991-1-7) [3].

$$T_i = 0,8(g_k + \psi \cdot q_k)sL \text{ или } 75 \text{ кН, – большая из этих величин;}$$

$$T_{ip} = 0,4(g_k + \psi \cdot q_k)sL \text{ или } 75 \text{ кН, – большая из этих величин,}$$

где  $g_k$  – постоянная нагрузка;

$q_k$  – временная нагрузка;

$s$  – расстояние между связями;

$L$  – пролет связи;

$\psi$  – соответствующий коэффициент для комбинационного сочетания нагрузок, в соответствии с выражением (6.11b) EN1990.

В зданиях класса 2а все балки должны рассчитываться как связи, работающие на растяжение.

Для зданий класса 2b требования к связям те же, что и для связей в зданиях класса 2а если используется тот же метод обеспечения устойчивости зданий.

Требования к горизонтальным связям зависят от результатов оценки риска. Но, тем не менее, рекомендуется использовать требования, приведенные для класса 2b как необходимый минимум.

### **Вертикальные связи**

Если используется метод обеспечения устойчивости зданий при помощи связей, то могут использоваться приведенные в Еврокоде рекомендации, сущность которых заключается в следующем:

Рекомендуется распределять воздействия нагрузок, возникающих при критических ситуациях, другими путями, удаленными от частично поврежденных конструкций. Вертикальные связи в этом случае уменьшают риск подбрасывания для верхнего перекрытия от воздействия взрыва.

Требования к вертикальным связям, приведенные в таблице А6 Еврокода (EN1991-1-7) [3], представлены ниже:

Связи в колоннах должны устраиваться от самого фундамента до уровня кровли;

Связи должны быть рассчитаны на восприятие горизонтальной нагрузки равной вертикальному усилию от постоянной и временной нагрузки для каждого этажа здания. Это нагружение должно рассматриваться как особое, т.е. без включения в него временных нагрузок, действующих на конструкцию.

Вертикальные силы растяжения в стыках колонн должны восприниматься накладками. Несущая способность накладок на действие вертикальных растягивающих сил должна приниматься равной несущей способности от воздействия суммарных вертикальных реакций балок в местах сопряжения их с колоннами в соответствующем уровне сопряжения с перекрытием.

В Еврокоде (EN1991-1-7) [3] в качестве варианта приводится метод воображаемого удаления колонны для определения горизонтальных и вертикальных растягивающих сил в связях для зданий класса 2b.



Используя метод воображаемого удаления, мы должны мысленно удалять по одному несущему элементу и рассматривать ситуацию в здании, чтобы убедиться, что допускаемые пределы локальных разрушений не превышены и здание сохраняет устойчивость.

В зданиях рамной системы поддерживающим элементом является колонна между этажами или балка, на которую опирается одна или несколько колонн.

Метод умозрительного удаления можно представить в виде четырех шагов:

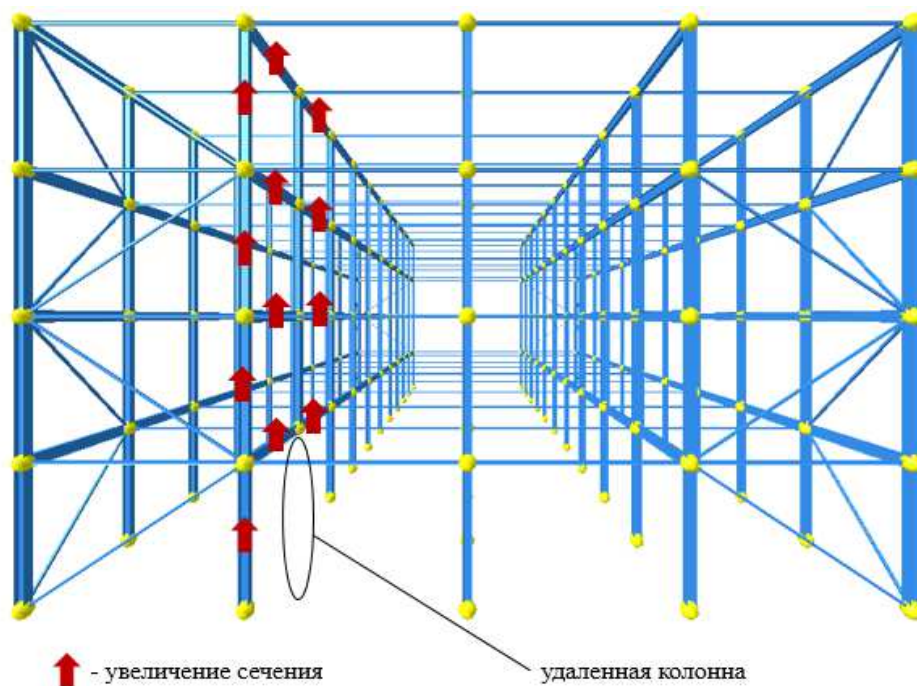
1. Колонна умозрительно удаляется;
2. Определяется площадь перекрытия над колонной, которая обрушится;
3. Проверяется вышележащее перекрытие на способность его выполнять свои функции при отсутствии колонны;
4. Проверяется нижнее перекрытие на возможность восприятия им нагрузки от обрушившейся на него массы обломков вышерасположенного перекрытия.

Нам представляется, что аналогичные требования по горизонтальным усилиям в балках и связевых элементах необходимо включить в национальные нормы и учитывать их при проектировании как особое воздействие, а также использовать рассмотренные мероприятия по повышению устойчивости зданий.

#### **Результаты расчета каркаса по методу умозрительного удаления колонны**

Для расчета на прогрессирующее обрушение методом умозрительного удаления колонн, был принят стальной каркас, представленный на рисунке.

Данный каркас является несущей конструкцией четырехэтажного офисного здания, который согласно классификации по Приложению А к Еврокоду (EN 1991-1-7) относится к классу 2b.



**Рисунок. – Схема каркаса здания с удалением колонны 1-го этажа**

Шаг колонн в поперечном направлении принят 6 м, в продольном 4 м, высота этажа 4 м. Общий размер здания в плане составляет 40х24 м. Высота здания 16 м.

Задача решалась путем многократного расчета с помощью программы Lira-SAPR с последовательным удалением одной за другой всех несущих колонн и определением усилий в остальных элементах. Решив поставленную задачу по расчету металлического

каркаса здания методом умозрительного удаления колонн на прогрессирующее обрушение, нами сделаны определенные выводы, а именно:

1. При расчете каркаса здания по методу умозрительного удаления колонн получены усилия в элементах, которые в некоторых случаях превышают первоначальные в 5 и более раз (для первого и второго этажей), для третьего этажа в 10 раз, усилие в балках четвертого этажа превышено на 5%. При этом вновь подобранные сечения по найденным усилиям дают увеличение расхода основного металла для балок до 54%, колонн до 31%. Следовательно, такое явление обязательно приведет к разрушению конструкции, если не будут приняты специальные меры по защите против прогрессирующего обрушения.

2. Учет таких воздействий на здания и сооружения может исключить возможность их внезапного прогрессирующего обрушения при принятии соответствующих мер, такими мерами могут быть системы горизонтальных и вертикальных связей в соответствующих местах, а также проектирование элементов как ключевых, когда каркас заранее проектируется на восприятие данных воздействий.

3. При выполнении этого расчета, мы убедились, что расчетная схема каркаса принципиально изменяется: в сжатых элементах конструкции появляются растягивающие усилия, которые необходимо учитывать при их креплении в стыках, и наоборот в растянутых элементах могут появиться сжимающие усилия, вследствие которых элементы теряют свою устойчивость.

Выполнив расчет стального каркаса на прогрессирующее обрушение методом умозрительного удаления колонн, мы можем рекомендовать три варианта повышения устойчивости здания:

1. Увеличить сечение элементов каркаса, т.е. для колонн принять двутавр 30КЗ, для несущих балок перекрытия и покрытия 45Б1 вместо рассчитанных на обычное эксплуатационное состояние 26КЗ и 35Б1.

2. Создать систему дополнительных вертикальных связей в торцах здания для перераспределения усилий при особом воздействии, выполнить расчет на прогрессирующее обрушение методом умозрительно удаления колонн и назначить новые сечения, которые должны обладать большей несущей способностью, но это превышение не будет существенным.

3. Запроектировать колонны первого этажа №89 и №173 в качестве ключевых элементов, способных выдерживать рекомендуемое в стандарте воздействие, выполнить расчет на прогрессирующее обрушение методом умозрительного удаления колонн и назначить новые сечения, которые должны превышать исходные не столь значительно.

Сравнивая данные варианты по приведенным затратам проектировщику необходимо принять наиболее оптимальное и экономичное решение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pearson, C. The Ronan Point Apartment Tower Collapse and its Effect on Building Codes / C. Pearson, N. Delatte // ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2005. – V. 19. – № 2. – P. 172–177.
2. UK Building regulations: Approved document A – London: British Standard Institute, 2013. – 49 p.
3. EN 1991-1-7 – Eurocode 1: Action on structures – Part 1.7: General actions – Accidental actions/ European Committee for Standardization. Brussels, 2006. – 53 p.
4. EN 1993-1-1 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings / European Committee for Standardization. Brussels, 2005. – 125 p.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА ДЛЯ РАСЧЁТА ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ ПО МОДЕЛИ УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ ГРУНТА

В.В. Артемёнок, А.П. Кремнёв, Н.Н. Вишняков  
Полоцкий государственный университет, Беларусь  
email: vika.artemenok2018@mail.ru

*Рассматривается проблема определения физико-механических характеристик грунта для расчета в программе Plaxis по модели упрочняющегося грунта (HardeningSoil). Описана методика определения всех характеристик. Были определены как стандартные характеристики, описанные в ГОСТ, так и дополнительные характеристики, методик определения которых в действующих нормативах нет.*

*Ключевые слова: расчётная модель, грунтовые основания, характеристики грунта, модель упрочняющегося грунта.*

## DETERMINATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SOIL FOR THE CALCULATION OF FOUNDATIONS AND FOUNDATIONS ACCORDING TO THE MODEL OF HARDENING SOIL

V. Artemyonok, A. Kremnev, N. Vishnyakov  
Polotsk State University, Belarus  
email: vika.artemenok2018@mail.ru

*The paper considers the problem of determining the physical and mechanical characteristics of the soil for calculation in the Plaxis program using the model of hardening soil. A technique for determining all characteristics is described. Both the standard characteristics described in the GOST and additional characteristics were determined, and there are no methods for determining them in the current standards.*

*Keywords: design model, soil bases, soil characteristics, model of hardening soil.*

В настоящее время для расчёта оснований фундаментов все больше применяются различные программные комплексы. Использование программных комплексов позволяет уменьшить трудоемкость расчетов и повысить их точность за счет более сложных расчетных моделей поведения грунта. Одним из таких широко применяемых комплексов является расчетный комплекс Plaxis. Он позволяет проводить широкий круг расчетов в области геотехники. Его особенностью является наличие различных моделей грунта, позволяющих с различной степенью адекватности описывать его работу. В PLAXIS есть возможность проводить расчёт в следующих моделях грунта: Мора-Кулона (Mohr-Coulomb (MC)), линейно-упругой (LinearElastic (LE)), упругопластической с упрочнением (HardeningSoil (HS)) и упругопластической с упрочнением при малых деформациях (HardeningSmallSoil (HSS)). При ручном счёте в основном используют модель Мора-Кулона, для которой необходимо 4 параметра, представленные в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры линейно-упругой идеально пластической модели Мора-Кулона

Символ	Название	Размерность
$E_0$	Модуль упругости	кН/м <sup>2</sup>
$\nu$	Число Пуассона	-
$C$	Сцепление	кН/м <sup>2</sup>
$\phi$	Угол внутреннего трения	град

Широкое использование модели Мора-Кулона обеспечивается, главным образом, за счет относительно небольшой сложности, что позволяет проводить расчеты в том числе и вручную [1]. Использование более сложных моделей грунта возможно только с использованием ЭВМ. Одной из таких моделей, все более часто применяемой, является упруго-пластическая модель HardeningSoil. Она представляет собой усовершенствованную модель поведения грунта под нагрузкой [1–3]. Особенность данной модели в том, что кроме определения стандартных характеристик грунта, используемой в классической модели Мора-Кулона, необходимо определение дополнительных характеристик (табл. 2).

Таблица 2. – Перечень параметров грунта для модели PLAXISHardeningSoil

Символ	Название	Единица измерения
$E_{50}$	Секущий модуль деформации	кН/м <sup>2</sup>
$G$	Модуль сдвига	
$K$	Модуль объёмной деформации	
$\nu$	Число Пуассона	-
$k_0$	Коэффициент бокового давления грунта	-
$p^{ref}$	Опорный уровень напряжений, $p^{ref} = 100$	кН/м <sup>2</sup>
$c$	Эффективное сцепление из трёхосных испытаний	
$\phi$	Эффективный угол внутреннего трения из трёхосных испытаний	град
$\psi$	Угол дилатансии	

Задачей данной работы было определение характеристик модели упрочняющегося грунта для песков мелких, отобранных на площадке строительства «МФК Газпром» в Минске.

Для решения поставленной задачи использовался автоматизированный испытательный комплекс АСИС [1]. Комплекс представляет собой совокупность устройств силового нагружения и управления давлением, приспособлений для испытаний образцов при различных видах напряжённого состояния, измерительной системы АСИС, а также программного обеспечения на базе ПЭВМ. При данных исследованиях использовались приборы одноплоскостного среза и стабилметр (прибор трёхосного сжатия) с автоматической системой нагружения и фиксацией перемещений.

Определение **угла внутреннего трения  $\phi$  и сцепления  $c$**  возможно методом одноплоскостного среза при трёх разных вертикальных нагрузках  $\sigma'_1$  или методом трёхосного сжатия при различных вертикальных  $\sigma'_1$  и ограничивающих давлениях  $\sigma'_3$ .

Определение упругих параметров **модулей упругости  $E$  и числа Пуассона** производилось при трехосных испытаниях в лаборатории. Пример графика, по которому определялись характеристики, представлен на рисунке 1.

Для расчета модуля упругости  $E_0$  для модели Мора – Кулона брался отрезок, составляющий 1/2...1/3 от напряжения разрушения.

Определение модуля сдвига  $G$ , модуля объёмной деформации  $K$  и секущего модуля деформации осуществляется по данным испытаний грунта в условиях трёхосного сжатия по формулам:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1 + 2\nu)} \quad (2)$$

$$E_{50} = \frac{(\sigma'_1)_{50} - \sigma'_{1C}}{(\epsilon_1)_{50}} \quad (3)$$

где  $\sigma'_{1C}$  – напряжение в конце этапа уплотнения;  
 $(\epsilon_1)_{50}$  – значение  $\epsilon_1$  при  $(\sigma'_1)_{50}$ .

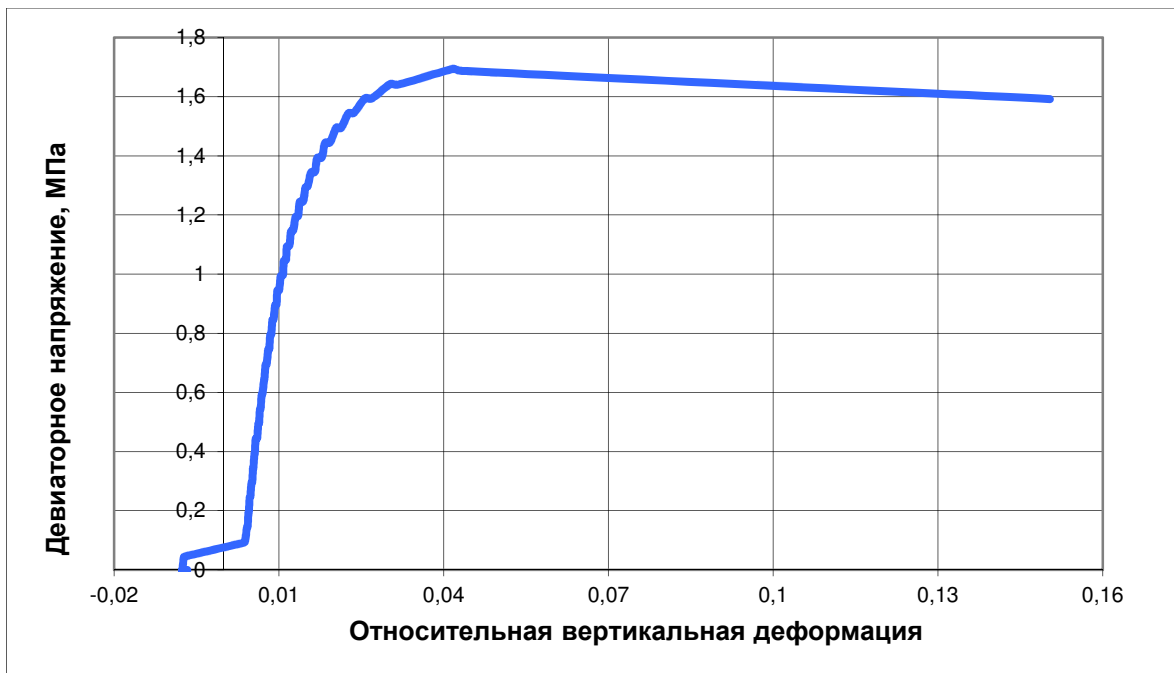


Рисунок 1. – Зависимость девиаторного напряжения от относительной вертикальной деформации

Число Пуассона определяется в результате непосредственного измерения продольных и поперечных деформаций по формуле

$$\nu = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \varepsilon_1} \right). \quad (4)$$

Для этого строится график зависимости относительных вертикальных деформаций от относительных объёмных деформаций (рис. 2).

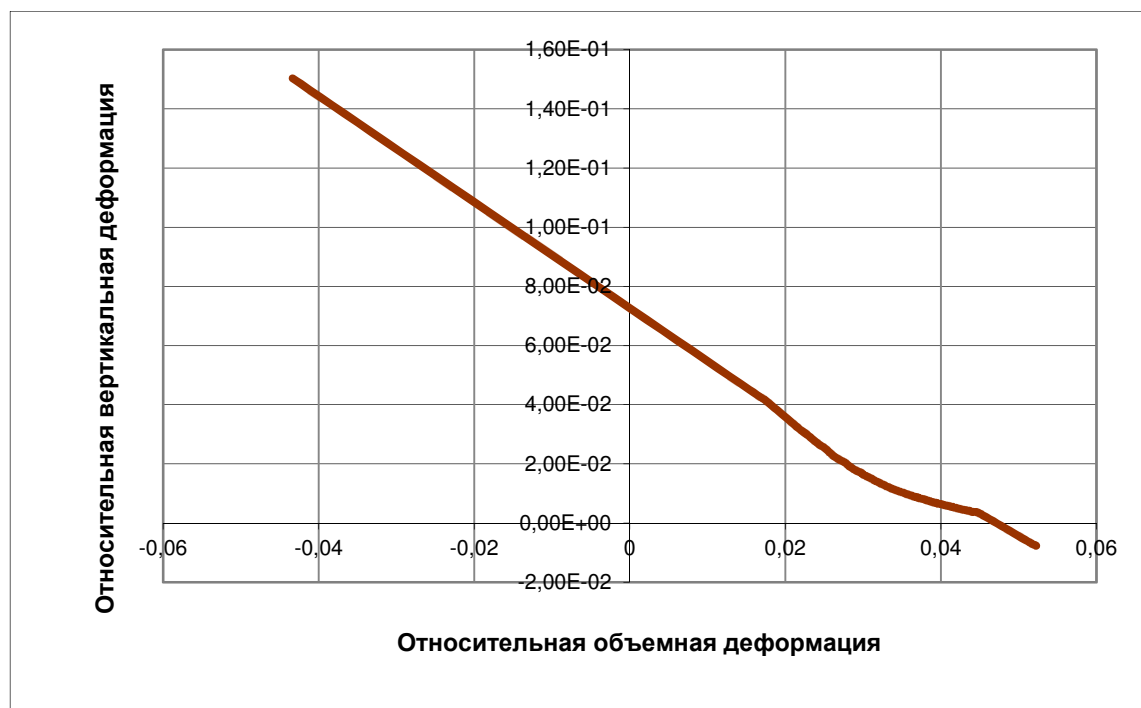


Рисунок 2. – Зависимость относительных вертикальных деформаций от относительных объёмных деформаций

Коэффициент бокового давления  $K_0$  определяется как отношение горизонтального напряжения  $\sigma'_h$  к действующему вертикальному напряжению  $\sigma'_v$  ( $K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$ ) при отсутствии боковых деформаций ( $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ ). Коэффициент бокового давления отражает мгновенное напряженно-деформированное состояние массива, и многократно меняется в геологическое время, при седиментации и нормальной консолидации является постоянной величиной, при увеличении вертикальных напряжений (наступление ледников, застройка)  $K_0$  – уменьшается, при разгрузке (отступлении ледников, эрозии, экскавации грунта)  $K_0$  – увеличивается.

Касаемо угла дилатансии  $\Psi$ , действующих нормативных документов по его определению в Беларуси на данный момент нет. Поэтому для его определения использовалось предложение M.D. Bolton [5] для условий плоской деформации по формуле (5), для этого строится график зависимости деформации сдвига от вертикальной деформации (рис. 3).

$$\operatorname{tg} \Psi_m = \frac{d\varepsilon_1}{d\gamma}. \quad (5)$$

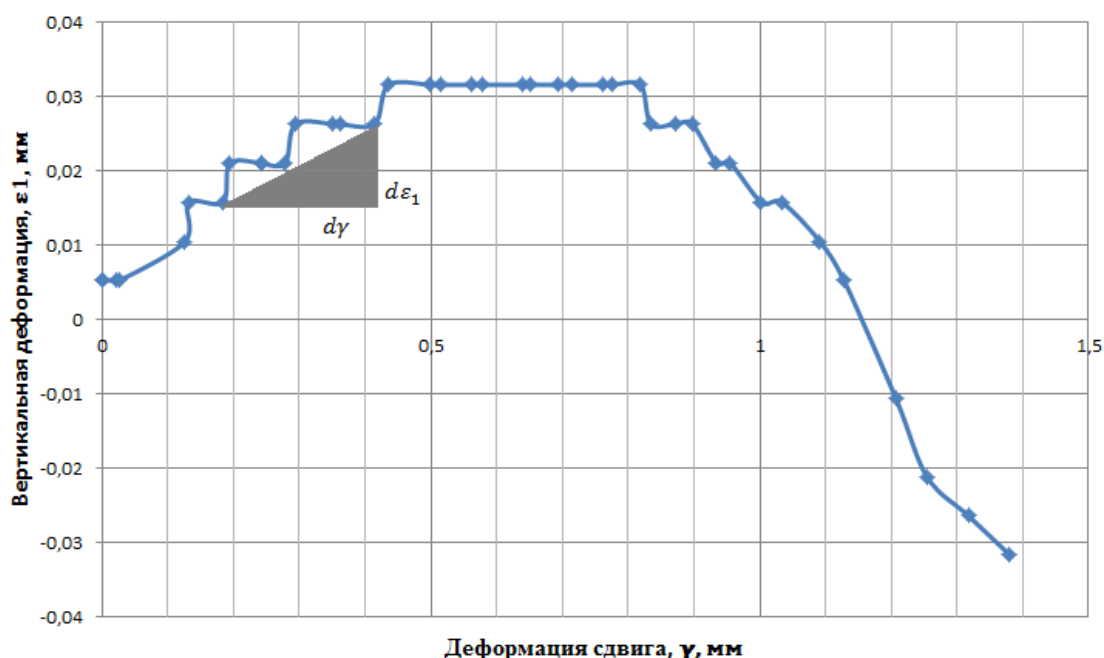


Рисунок 3. – Зависимость деформации сдвига от вертикальной деформации

На графике выбирается участок, для которого определяется угол дилатансии, и по формуле (5) находится искомый угол. Для данного участка угол дилатансии равен  $2,6^\circ$ .

По результатам проведённой работы были определены характеристики, необходимые для расчёта оснований и фундаментов в программном комплексе PLAXIS по модели упрочняющегося грунта. Кроме стандартно описанных в ГОСТ 12248 были определены дополнительные характеристики, которых в нормативах нет.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. PLAXIS, 2D Version 8 [Electronic resource] / Brinkgreve R.B.J. [et al.]. – Balkema, 1997. – 200 p. – Mode of access: <http://www.plaxis.nl/index.php?cat=manuals&mouse=Plaxis%20V8>.



2. Schanz, T. Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien / T. Schanz // Mitt. Inst. für Geotechnik 45. Universität Stuttgart. – Stuttgart, 1998. – 152 s.
3. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening Soil Model: Formulation and verification [Electronic resource] / T. Schanz, P.A. Vermeer, P.G. Bonnier // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. – Balkema, Rotterdam, 1999. – P. 281–290. – Mode of access: <http://www.unistuttgart.de/igs/content/publications/40.pdf>.
4. Артемёнок, В.В. Влияние анизотропии на прочностные характеристики грунта при испытании в приборе одноплоскостного среза [Электронный ресурс] / В.В. Артемёнок [и др.] // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкий государственный университет. Сер. Прикладные науки. Строительство. – 2017. – Вып. 19 (89). – С. 172–174. – Электронный оптический диск – 1 CD-ROM.
5. Vermeer, P.A. Nonassociated plasticity for soils, concrete and rock / P.A. Vermeer, R. De Borst // Heron. – 1984. – № 29 (3). – 62 p.

## УСИЛЕНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ ТКАНЕЙ

А.Р. Волик, Т.С. Новикова, А.А. Свинцицкий

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

email: a.volick@grsu.by, tanyu013@mail.ru, fewgma@mail.ru

*Представлены результаты экспериментальных исследований железобетонной балки, усиленной углеродной лентой FibArmTap в качестве внешней арматуры на растянутой грани. Анализ экспериментальных данных показал, что усиление железобетонных балок путем наклейки углеродной ленты на растянутую грань увеличивает несущую способность в 3,47 раза.*

*Ключевые слова: усиление, железобетонная балка, несущая способность, композитная ткань, углеродная лента.*

## STRENGTHENING OF BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH APPLICATION OF COMPOSITE TISSUE

A. Volik, T. Novikova, A. Svintsitskyi

Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus

email: a.volick@grsu.by, tanyu013@mail.ru, fewgma@mail.ru

*The article presents the results of experimental studies of a reinforced concrete beam reinforced by carbon tape FibArmTap as external reinforcement on the tensile face. Analysis of the experimental data showed that reinforcement of reinforced concrete beams by sticking a carbon tape on the tensile face increases the bearing capacity by 3.47 times.*

*Keywords: strengthening, reinforced concrete beam, bearing capacity, composite cloth, carbon tape.*

В последние годы остро обозначилась проблема восстановления эксплуатационных характеристик железобетонных конструкций, поврежденных в результате природных воздействий, техногенных аварий и катастроф. Кроме того, эксплуатация железобетонных конструкций в условиях агрессивных сред, температурных и климатических воздействий, а также изменения технологии эксплуатации и увеличение в результате реконструкции нагрузок приводят к необходимости работ по восстановлению и усилению железобетонных конструкций.

В связи с этим разработано большое количество способов усиления железобетонных конструкций: изменение геометрических размеров поперечного сечения; устройство внешних конструкций (затяжек, опор и т.д.), которое приводит к изменению архитектурного вида сооружения; устройство дополнительного внешнего армирования из металлических уголков, листовой стали, дополнительной арматуры на полимеррастворе и др.

Анализ железобетонных конструкций показал то, что изменение геометрических размеров поперечного сечения и устройство внешних конструкций исчерпало себя. Дальнейшее их развитие принесёт незначительную экономию материалов, в то время как существует потребность в гораздо большей экономии.

В настоящее время для восстановления железобетонных конструкций предлагается использование композитных материалов. Усовершенствование железобетонных конструк-

ций с использованием композитных материалов поможет достичь большей экономии материала, однако необходимо обеспечить эффективное использование свойств каждого материала и их совместную работу. Для решения этих вопросов возможно использование пассивных методов усиления, а именно наклеивание композитных тканей, холстов.

Усиление железобетонных конструкций композитными тканями имеет ряд преимуществ по сравнению с усилением традиционными методами:

- сохраняется первоначальное сечение элемента конструкции;
- усиление стен, несущих конструкций и перекрытий не влечет увеличение массы конструкций;
- композитные материалы имеют высокую коррозионную стойкость;
- простое применение, сжатые сроки при производстве работ;
- возможно избежать возведения сложных подмостей, не требуется грузоподъемное оборудование;
- отсутствуют размерные ограничения, так как длина холстов и ламинатов составляет не менее 50 м.

В большинстве случаев усиление конструкций (в том числе и несущих) предлагается углепластиком, которое оказывается конкурентоспособно по сравнению с традиционными методами как по срокам производства работ, так и по стоимости. Несмотря на высокую стоимость композитов, использование их для усиления строительных конструкций во многих случаях оказывается экономически целесообразно, так как реконструкцию можно выполнять без вывода сооружения из эксплуатации, при этом значительно сокращается трудоемкость производства. Сравнение композиционных материалов различных фирм показывает, что для каждой системы эквивалентные уровни напряжений могут быть обеспечены путем изменения ширины или количества уложенных слоев. Преимущество полос большой ширины при фиксированном усилении заключается в увеличении площади сцепления и соответствующем снижении контактных напряжений.

В результате экспериментальных исследований [1] было установлено, что балки, армированные углеродным холстом, работают более упруго и имеют повышенную жесткость по сравнению с железобетонными балками. Прочность таких балок зависит от способа укладки армирующего холста и, соответственно, от его сцепления с бетоном. При соответствующем обосновании армирование бетонных балок углеродными холстами может быть альтернативой предварительно напряженной стальной арматуре.

В настоящее время осуществляется производство различного вида композитных материалов, однако нормативная база по использованию композитных материалов отсутствует. Поэтому данная работа актуальна и позволяет эффективно использовать композитное армирование в бетонных и железобетонных конструкциях.

Для определения эффективности усиления изгибаемых элементов композитной тканью (углеродной лентой) были проведены экспериментальные исследования балок размерами 60×120×1000 мм, усиленные композитной тканью (углеродной лентой Fib Arm Tap 530/300). Балки были изготовлены на заводе КПД ОАО «Гродножилстрой» из бетона класса C25/30.

За образец эталон (Б1) выбрана железобетонная балка, армированная сварным каркасом, изготовленным при помощи точечной сварки из арматуры класса S500. Балка армирована. Второй образец – железобетонная балка (Б2), усиленная одним слоем углеродной ленты Fib Arm Tap. Внутреннее армирование балки такое же, как и у балки Б1: в растянутой зоне армирована металлической арматурой Ø8 класса S500. Поперечная арматура Ø4 класса S500 установлена с шагом 50 мм, арматура сжатой зоны – Ø8 класса S500 (рис. 1). Сцепление углеродной ленты с бетоном выполнено с помощью эпоксидного клея на трех поверхностях (две торцевых и нижняя).

Испытания опытных балок производили по балочной схеме с приложением сосредоточенных усилий в третях пролета.

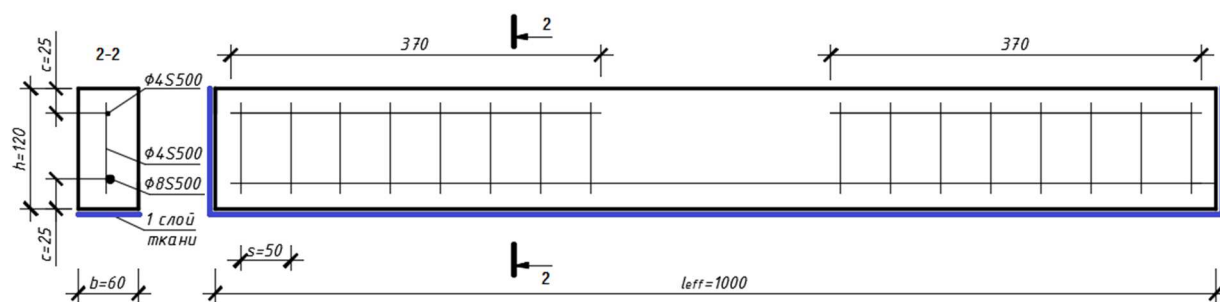


Рисунок 1. – Схема армирования усиленной балки

Анализ результатов несущей способности экспериментальных балок показал (рис. 2), что:

– разрушение эталонной железобетонной балки (Б1) произошло по нормальному сечению в зоне чистого изгиба в результате пластических деформаций в растянутой зоне арматуры, приводящих к раздроблению бетона сжатой зоны. Величина разрушающего момента составила 1,35 кНм.

– разрушение усиленной балки (Б2) произошло по нормальному сечению в зоне чистого изгиба с величиной разрушающего момента 3,75 кНм. В процессе нагружения балки (Б2) при нагрузке 13 кН появилось отслоение краев углеродной ленты FibArmТарв центральной части балки. При достижении нагрузки 20 кН произошел отрыв ткани на правом торце балки Б2 и снизилась нагрузка до 8,7 кН, балку повторно нагружали. Балка Б2 равномерно нагружалась до 25 кН, затем произошел отрыв ткани по контуру, нагрузка снизилась до 10 кН и произошло разрушение балки без разрыва ткани.



Рисунок 2. – Характер разрушения экспериментальных балок

Момент трещинообразования в железобетонной балке Б1 составил 0,3 кН·м, что составляет 28% от разрушающего момента, в усиленной балке Б2 – 0,89кН·м, что соответствует 24%  $M_{rd}$ .

Анализ экспериментальных данных показал (рис. 3), что усиление железобетонных балок путем наклейки углеродной ленты на растянутую грань увеличивает несущую способность в 3,47 раза.

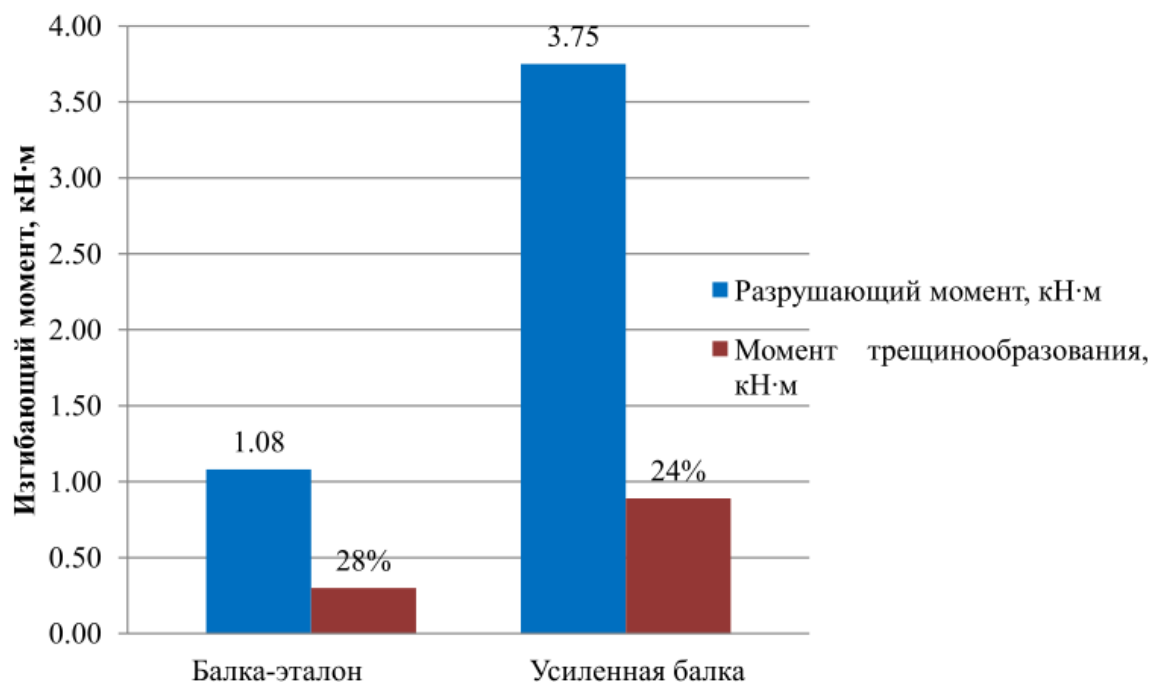


Рисунок 3. – Сопоставление разрушающих моментов и моментов образования трещин для испытываемых балок

**Вывод.** Проведённые экспериментальные исследования показали возможность использования углеродной ленты FibArmTar в качестве внешней арматуры на растянутой грани в изгибаемых железобетонных балках. Внешнее армирование одним слоем углеродной ленты способствует увеличению несущей способности балок на 347%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Применение неметаллических материалов в качестве основного армирования бетонных изгибаемых элементов / Я.А. Пронозин [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 7. – С. 60–61.
2. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. – М. : ООО «Интераква», 2006. – 50 с.
3. Овчинников, И.Г. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитными материалами / И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев // Наукоедение. – 2012. – С. 1–22.
4. Reinforced plastics [Electronic resource] / Connecting the materials community. Materials today. – Mode of access: <http://www.materialstoday.com/composite-industry/features/the-grp-market-in-europe-2015>. – Date of access: 23.11.2015.

## ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ФУНДАМЕНТОВ РАСПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Н.Н. Вишняков, А.П. Кремнев

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: n.vishniakov@psu.by

*В статье приведены результаты определения прочностных характеристик глин озерно-ледникового происхождения в приборе трехосного сжатия в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Полученные данные были использованы при расчете устойчивости фундамента, на который действует как вертикальная, так и горизонтальная силы. Подтверждается влияние анизотропии прочностных свойств грунтов на несущую способность фундаментов распорных сооружений.*

*Ключевые слова: грунт, анизотропия грунта, фундамент, распорное сооружение, несущая способность, коэффициент устойчивости.*

## INFLUENCE OF ANISOTROPY OF STRENGTH PROPERTIES OF SOILS ON THE BEARING CAPACITY OF FOUNDATIONS OF SPACER STRUCTURES

N. Vishniakov, A. Kremnev

Polotsk State University, Belarus

email: n.vishniakov@psu.by

*The results of the determination of the strength properties of clays of glacial origin in a triaxial tests in two mutually perpendicular directions are presented in the article. The obtained data were used in calculating the stability of the foundation, on which both vertical and horizontal forces act. The effect of anisotropy of strength properties of soils on the bearing capacity of foundations of spacer structures is confirmed.*

*Keywords: soil, anisotropy of soil, foundation, spacer structure, bearing capacity, coefficient of stability.*

Согласно действующим нормативным документам, для фундаментов, на которые действуют значительные горизонтальные нагрузки, обязательно выполняется расчет по первой группе предельных состояний (по несущей способности и устойчивости). Примером зданий, в которых на фундаменты передается распор, могут служить большепролетные сооружения (амфитеатры, спортивные стадионы и ледовые катки, ангары различного назначения) и сооружения животноводческого комплекса с применением железобетонных или стальных полурам, работающих по схеме трехшарнирных арок.

Определение несущей способности основания фундаментов рекомендуется производить графоаналитическими методами, в частности, методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения, особенно, если основание слагают неоднородные грунты [1].

Точность расчета в первую очередь зависит от исходных данных и принятой расчетной модели грунта. Основными исходными данными для расчета оснований фундаментов являются механические характеристики грунтов. В то же время при их определении не всегда учитывается такая важная особенность грунтов, как анизотропия механических свойств.

Для расчетной модели в классической механике грунтов принято считать, что грунт представляет собой сплошную изотропную среду, поэтому анизотропия не учитывается ни при определении физико-механических свойств грунтов, ни при расчете оснований и фундаментов. Это сказывается на результатах расчета, которые не всегда согласуются с фактическими данными испытаний. Поэтому совершенствование методов расчета задач механики грунтов невозможно представить без совершенствования методов определения основных механических характеристик грунтов.

Согласно многим исследованиям, большинство грунтов обладает анизотропией. Так, Н.А. Цытович предполагал, что грунты с ярко выраженной слоистостью обладают анизотропией. Сейчас можно сказать, что анизотропией обладают грунты не только с выраженной слоистостью, но и также без нее.

Можно выделить следующие виды анизотропии: деформационная, фильтрационная, анизотропия прочностных свойств, а также анизотропию некоторых специфических свойств: набухание, теплопроводность, скорость распространения волн и т.д.

В данной статье приводятся результаты исследования анизотропии прочностных свойств ленточных глин озерно-ледникового происхождения, широко распространенных на севере Беларуси, при испытании на одноплоскостной срез. Исследуемые грунты обладают ярко выраженной анизотропией, обусловленной условиями их формирования. Эти образования относятся к периоду поозерского ледника. Они формировались в приледниковых озерах, являющихся аккумуляторами тонкообломочного материала [2].

Анизотропия рассматриваемых отложений обуславливается, во-первых, слоистой текстурой грунтов, связанной с сезонным поступлением обломочного материала и, во-вторых, преобладающей ориентацией частиц грунта, которые, как показывают исследования [1], располагаются большей осью параллельно горизонту.

Таким образом, ленточные глины в большинстве своем имеют плоскость (направление) слоистости, обусловленную условиями формирования данных грунтов. То есть данные грунты можно рассматривать как трансверсально-изотропную среду, в которой прочностные характеристики грунтов будут различаться в зависимости от угла наклона плоскости слоистости к плоскости сдвига. Поэтому требуется определение прочностных характеристик грунтов как минимум в двух направлениях: вдоль и поперек слоистости.

Зная механические характеристики грунтов в двух взаимно перпендикулярных направлениях, возможно использование известных закономерностей изменения значений угла внутреннего трения и удельного сцепления в зависимости от ориентации поверхности сдвига по отношению к плоскости изотропии.

Одной из первых известных зависимостей для испытаний грунтов на прямой сдвиг, было уравнение Казагранде-Карилло:

$$S_{\alpha} = S_0 + (S_{90} - S_0)\sin^2 \alpha, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – угол наклона плоскости среза к плоскости слоистости;

$S_0$ ,  $S_{90}$  – прочность (сопротивление сдвигу) по плоскостям среза с углами  $\alpha=0^\circ$  и  $\alpha=90^\circ$ , т.е. вдоль и поперек плоскости напластования.

Аналогичную зависимость для определения уже прочностных характеристик грунтов приводит П.Л. Иванов [3]:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{\alpha} &= \operatorname{tg} \varphi_1 + (\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1) \sin^2 \alpha, \\ c_{\alpha} &= c_1 + (c_2 - c_1) \sin^2 \alpha, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где  $\alpha$  – угол наклона площадки сдвига к плоскости слоистости;  $\operatorname{tg} \varphi_1$ ,



$c_1$  – характеристики прочности при сдвиге по направлению слоистости (вдоль плоскости изотропии);  $\operatorname{tg}\varphi_2$ ,

$c_2$  – то же при сдвиге поперек слоистости (поперек плоскости изотропии).

По словам А.К. Бугрова [4], зависимость (1.1), следовательно, и (1.2) широко используются в практике расчетов, и во многих работах анализировалась достоверность данной зависимости.

Существуют и другие зависимости изменения прочности от направления сдвига. Например, для глин известна следующая зависимость:

$$\tau_{\alpha} = A\alpha^k + \tau_0, \quad (1.3)$$

где  $A$  и  $k$  – эмпирические коэффициенты.

При использовании любой из зависимостей необходимо определение прочностных характеристик в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для определения прочностных характеристик ленточной глины в двух взаимно перпендикулярных направлениях в лабораторных условиях мы использовали метод одноплоскостного среза. Для решения поставленной задачи использовался автоматизированный испытательный комплекс АСИС.

Комплекс представляет собой совокупность устройств силового нагружения и управления давлением, приспособлений для испытаний образцов при различных видах напряжённого состояния, измерительной системы АСИС, а также программного обеспечения на базе ПЭВМ.

Размер образцов составлял: 71 мм – диаметр, 35 мм – высота. Испытания проводились по консолидировано-дренированной схеме по ГОСТ 12248. Общий вид образцов после испытания представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. – Образцы ленточной глины после испытания на срез

В результате испытаний срез нескольких образцов при горизонтальном направлении слоистости произошёл по песчаной прослойке, вследствие чего сопротивление сдвигу оказалось значительно ниже, чем для образцов, в которых срез произошёл не по прослойке.

После обработки результатов испытаний, были получены прочностные характеристики образцов ленточной глины. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

По представленным данным можно сделать вывод, что полученные значения удельного сцепления и угла внутреннего трения при сдвиге при вертикальном расположении слоистости на 12 % и 28 % соответственно больше, чем при сдвиге при горизонтальном

расположении слоистости. При срезе образцов по песчаной прослойке характеристики грунта в 2 и более раза оказались меньше, чем при срезе не по прослойке.

Таблица 1. – Прочностные характеристики грунта

Прочностные характеристики грунта	Сдвиг при горизонтальном расположении слоистости	Сдвиг при вертикальном расположении слоистости	Сдвиг по песчаной прослойке
Удельное сцепление грунта, кПа	19,12	21,77	5
Угол внутреннего трения $\varphi$ , %	7,91	10,98	5

Такое расхождение в определении механических характеристик грунта, несомненно, будет влиять на результаты расчета фундаментов. В частности, на определение несущей способности (устойчивости) фундаментов.

Для подтверждения данного предположения были проведены расчеты устойчивости фундамента распорного сооружения с учетом и без учета анизотропии прочностных свойств.

Расчёт производился в программе FSS-PSU, разработанной в Полоцком Государственном университете. Программа является объективно-ассоциативной системой, позволяющей организовать хранение и манипулирование сложноструктурированными данными. Позволяет выполнить расчёт устойчивости по методу круглоцилиндрических поверхностей при любых грунтовых основаниях. При этом поиск наиболее опасных поверхностей скольжения выполняется итерационным методом по специальному алгоритму [статья Глухова в Вестнике]. Важной особенностью программы является возможность учёта анизотропии прочностных свойств грунта. В данном случае, анизотропия учитывалась по зависимости (1.2).

Программа FSS-PSU позволяет производить расчёт устойчивости откосов и расчёт несущей способности фундамента.

При расчете устойчивости фундаментов в программе вначале задаются размеры фундамента, а затем в уровне обреза прикладываются силы: вертикальная, по центру тяжести фундамента, и горизонтальная. Фундамент рассматривается как твёрдое тело, через которое не могут проходить поверхности скольжения. Все поверхности скольжения проходят через левую точку опирания фундамента. На рисунке 2 для примера приведена одна из расчетных поверхностей скольжения.

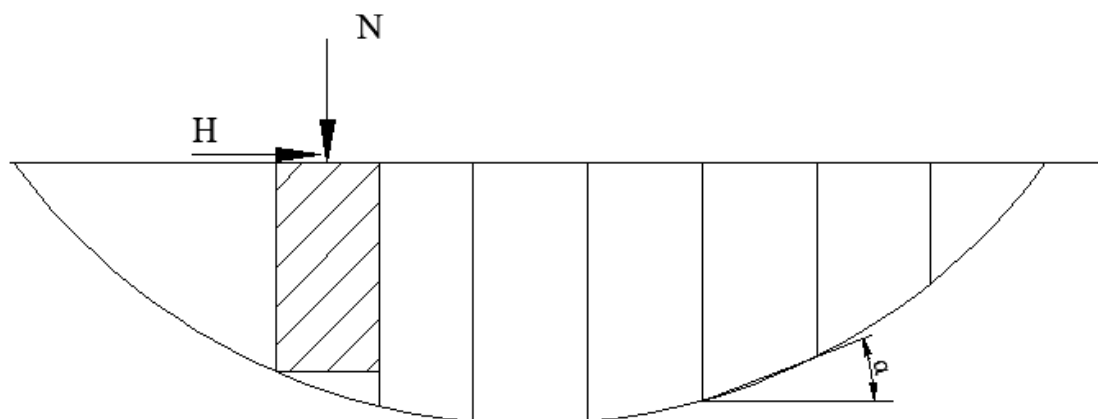


Рисунок 2. – Расчетная схема определения устойчивости фундамента:

$\alpha$  – угол наклона площадки сдвига к плоскости слоистости;

N – вертикальная сила, H – горизонтальная сила

Глубина заложения фундаментов для расчёта принимались 1,2, 1,6, 2,0 м и расчет проводился с учётом и без учёта анизотропии прочностных свойств. Нагрузки на фундамент принимались во всех случаях одинаковыми. Пример расчета фундамента в программе FSS-PSU приведен на рисунке 3.

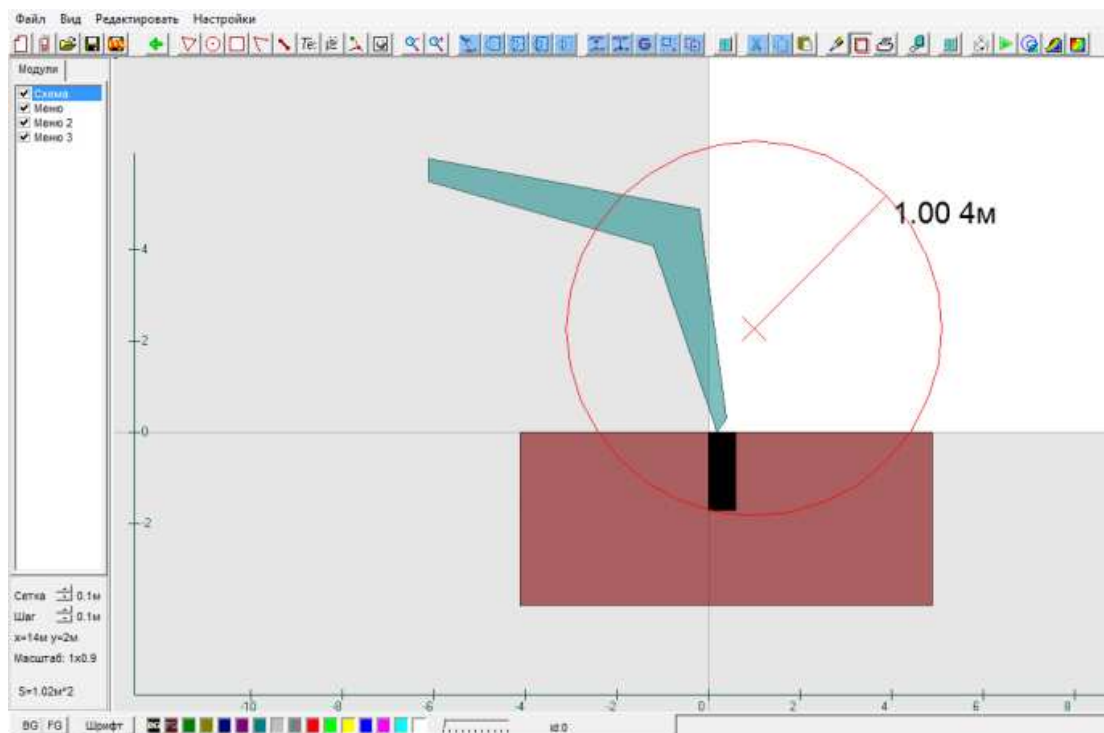


Рисунок 3. – Пример определения устойчивости фундамента (полурама показана условно)

По результатам расчета была составлена сравнительная таблица 2.

Таблица 2. – Результаты расчета устойчивости фундаментов

Глубина заложения фундамента, м	Без учёта анизотропии		С учётом анизотропии	
	Коэффициент устойчивости	Радиус скольжения, м	Коэффициент устойчивости	Радиус скольжения, м
1,2	1,0	4,1	1,02	3,98
1,6	0,94	4,73	0,98	5,11
2,0	1,02	3,57	1,03	5,17

При использовании характеристик грунта, полученных при срезе по песчаной прослойке, коэффициент устойчивости оказался равен 0,21.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что с учётом анизотропии прочностных свойств грунта коэффициент устойчивости фундамента больше, чем без учёта анизотропии. Нужно отметить, что на величину различия коэффициентов устойчивости будет, несомненно, влиять процент различия прочностных характеристик грунта, а также, возможно величины действующих нагрузок.

При использовании прочностных характеристик грунта, полученных при срезе по песчаной прослойке, коэффициент устойчивости с учетом анизотропии получается больше в 4 и более раза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Справочник проектировщика / Сорочан, Е.А. [и др.] ; под общ. ред.: Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. – М. : Стройиздат, 1985. – 480 с. с ил.
2. Павловская, И.Э. Полоцкий ледниково-озерный бассейн: строение, рельеф, история развития / И.Э. Павловская. – Минск : Навука і тэхніка, 1994. – 128 с.
3. Иванов, П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений / П.Л. Иванов. – М. : Высш. шк., 1991. – 447 с.
4. Бугров, А.К. Анизотропные грунты и основания сооружений / А.К. Бугров, А.И. Голубев. – СПб. : Недра, 1993. – 245 с.
5. Кремнев, А.П. Определение наиболее опасной поверхности скольжения при расчете устойчивости откосов методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения / А.П. Кремнев, Д.О. Глухов, Н.Н. Вишняков // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Прикладные науки. Строительство. – 2011. – С. 37–41.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ

Т.Г. Козьянина, А.И. Колтунов

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: t.ermolaeva@psu.by

*При реконструкции существующих зданий и сооружений немаловажным этапом является определение характеристик арматуры и бетона (толщина защитного слоя, расположение арматуры, диаметр, прочностных характеристик и т.п.). В данной статье представлен анализ возможности корректного использования на практике метода контроля прочности арматуры по результатам измерения твердости, представлены зависимости перехода от твердости к классу арматурной стали, используемой в преднапряженных конструкциях, обобщен опыт использования приборов контроля прочности бетона.*

*Ключевые слова: неразрушающие методы контроля, арматурная сталь, переносные твердомеры, твердость арматурной стали, бетон, прочностные характеристики бетона.*

## USING NON-DESTRUCTIVE METHODS OF CONTROL IN THE EXAMINATION OF CONSTRUCTIONS OF RECONSTRUCTED BUILDINGS

T. Kazyanina, A. Koltunov

Polotsk State University, Belarus

email: t.ermolaeva@psu.by

*When reconstructing existing buildings and structures, an important stage is the determination of the characteristics of reinforcement and concrete (the thickness of the protective layer, the location of the reinforcement, the diameter, strength characteristics, etc.). This article presents an analysis of the possibility of correct use of the method of checking the strength of reinforcement on the basis of hardness measurement results. The dependence of the transition from hardness to the class of reinforcing steel used in prestressed structures is presented. The experience of using concrete strength control is generalized.*

*Keywords: non-destructive testing methods, reinforcing steel, portable hardness testers, hardness of reinforcing steel, concrete, strength characteristics of concrete.*

В большинстве нормативных и технических документов по обследованию зданий и сооружений предоставлены рекомендации по определению прочностных свойств арматуры. Однако не все методы позволяют достоверно и точно определить искомые характеристики. Часть методов устарела, некоторые практически не применимы из-за трудностей, сопровождающих их использование. Перспективными считаются неразрушающие методы, позволяющие определить класс арматуры по измерению твердости стали. Исследованиям зависимости между прочностью и твердостью сталей на сегодняшний день посвящено много работ. Основополагающая зависимость для сталей отражена в ГОСТ 2276-77 «Металлы и сплавы. Метод измерения прочности по Бринеллю переносными твердомерами статического действия» [1, 2].

На базе Полоцкого государственного университета проводились экспериментальные исследования твердости преднапряженной арматуры, влияния глубины среза арматурного стержня с использованием переносного твердомера. Выполнен анализ влияния физико-механических характеристик бетона и арматуры на несущую способность конструкций с учетом погрешностей методов измерения.

Для проведения экспериментальных работ были отобраны образцы классов S800, S540 и S600. В ходе планирования эксперимента было определено количество образцов, необходимое для получения зависимости «твердость – прочность», определены факторы, влияющие на результаты испытаний. В качестве варьируемых факторов рассматривались способы получения арматуры (термомеханически-упрочненная, полученная за счет легирующих добавок), величина среза арматурного стержня (размер шлифа 1,2,3 мм), диаметры арматуры (10, 12,14 мм). На каждом стержне производилось по 15 испытаний.

В результате проделанной работы определена зависимость между показателями твердости и временным сопротивлением материалов испытываемых образцов. При помощи соотношения значений временного сопротивления образцов и их показателей твердости в программе Excel была получена линейная зависимость:

$$\sigma_B = (15HR + 570) \pm 5 \text{ при } p = 0,7973.$$

С учетом изменчивости временного сопротивления для изучаемых классов можно выделить зоны идентификации класса арматуры. Для сравнения приведем наглядное отражение зонирования классов арматуры по граничным значениям временного сопротивления и твердости стали для образцов диаметром 12 мм, классов S540 и S800 на срезе 1, 2, 3 мм (рис. 1).

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что оптимальной глубиной среза для определения временного сопротивления является шлиф 2 мм. Так как на рисунке 1 видно, что только на срезе 2 мм значения временного сопротивления для классов S540, S600 и S800 не дают пересечения на графике. Однако, необходимо проведение дополнительных исследований для арматурных стержней больших диаметров, так как при больших диаметрах необходимая глубина среза может оказаться больше, в зависимости от способа изготовления арматуры.

Проверка возможности использования метода неразрушающего контроля выполнялась на плите пустотного настила серии 1.141-1. Диаметр арматуры уточнялся путем механического вскрытия защитного слоя арматуры. При этом определялось состояние арматуры, характер и степень ее коррозии, которая оценивалась глубиной и площадью повреждения. Механические характеристики арматуры определялись по виду профиля, установленного при вскрытии, а также при помощи портативного твердомера Константа K5У, на заранее подготовленных поверхностях, с последующим выведением зависимости «прочность-твердость».

Испытания для определения твердости образцов арматурной стали проводились с использованием портативного твердомера Константа K5У. Методику определения класса арматуры можно представить следующим образом:

1. Определение положения арматурных стержней.
2. Вскрытие защитного слоя бетона и определение параметров армирования при помощи косвенных характеристик в местах, где арматурный стержень не достигает максимальных изгибающих моментов и не нарушается анкеровка (на расстоянии  $\frac{1}{4}$  длины пролета).
3. Очистка поверхности арматурного стержня с устройством среза необходимой глубины длиной 100 мм на каждом стержне.

4. Поверхность образцов в месте испытания дорабатывается до необходимой шероховатости угловой шлифовальной машинкой (УШМ) с использованием насадки малой зернистости. Параметр шероховатости должен быть не более  $Ra = 0,32$  мкм [6].

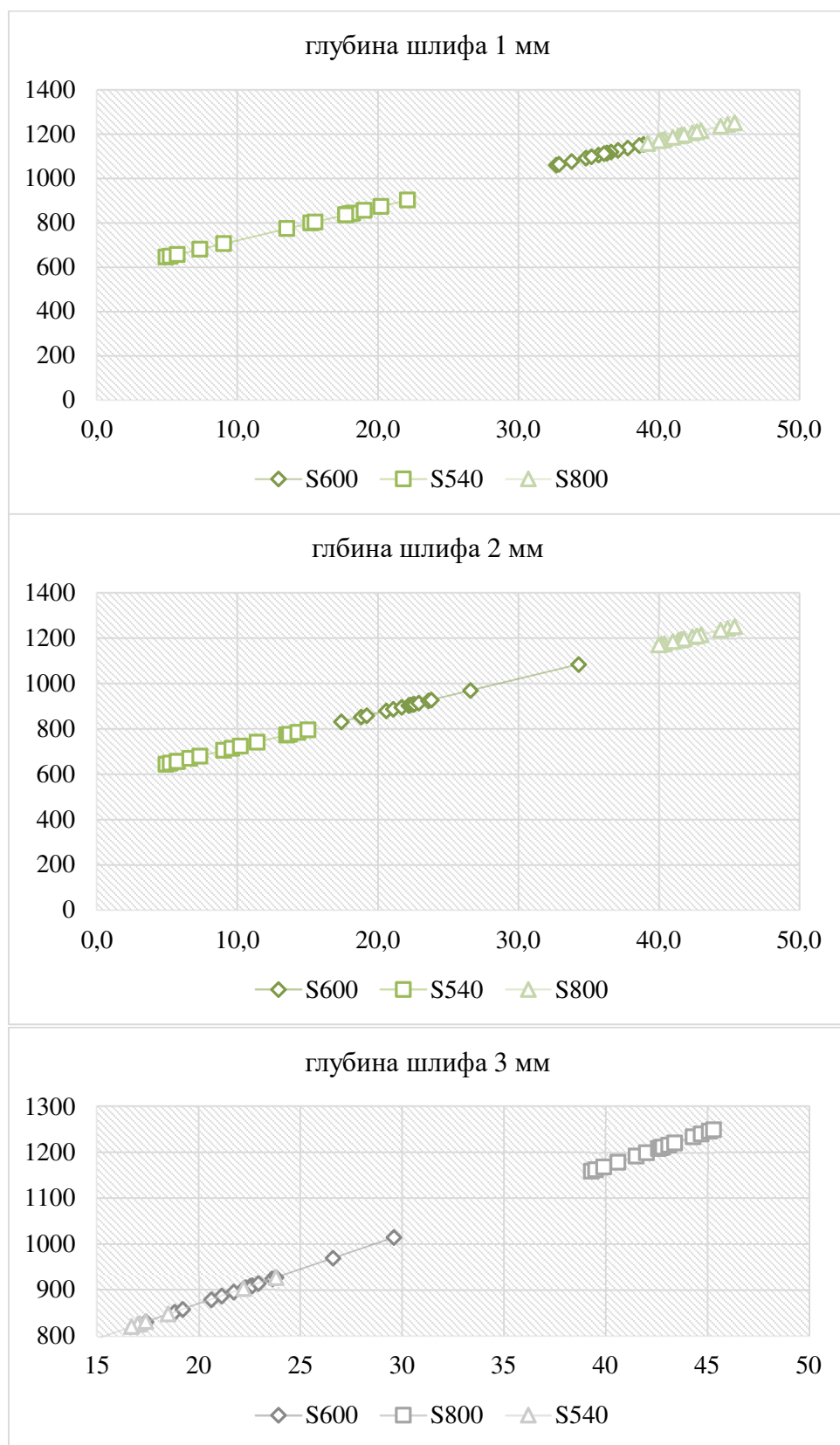


Рисунок 1 – Зонирования классов арматуры по граничным значениям временного сопротивления и твердости стали



5. Выполнение 15 испытаний для каждого стержня.

6. Выведение среднего и определение временного сопротивления арматурного стержня по выведенной зависимости «твердость-прочность».

Так как при испытаниях арматурного стержня в теле железобетонной конструкции и зажатых в тисках, на результатах измерений могут сказываться условия фиксации, то были проведены сравнительные испытания на стержнях, извлеченных из существующей конструкции и находящихся в ее теле. В обоих случаях показания твердомера не имели существенных отличий. Таким образом, можно сделать вывод о достоверности проведенных испытаний.

Что касается определения прочностных характеристик бетона, имеется большое число методов контроля применяемых на практике. Условно их можно разделить на три основные группы: разрушающие, путем отбора проб, неразрушающее прямые и неразрушающие косвенные. Среди наиболее распространенных на сегодняшний день методов неразрушающего контроля для определения прочности бетона являются методы третьей группы: ультразвуковой метод по ГОСТ 17624-2012 [3], методы ударного импульса и упругого отскока по ГОСТ 22690-88 [4]. Стоит отметить, что ультразвуковые приборы могут использоваться не только для контроля прочности бетона, но и для дефектоскопии, контроля качества бетонирования, определения глубины трещин и т. д. Также следует отметить, что прочность бетона не является единственным фактором, влияющим на долговечность и прочность всей конструкции в целом. Бетон следует рассматривать как материал с колеблющимися характеристиками по случайному принципу. Для достижения одного и того же класса бетона можно использовать множество различных вариаций составов бетонной смеси. Таким образом конструкции имеющие один и тот же класс бетона могут различаться по своей структуре. Это связано с применением различных технологических и материаловедческих подходов. К основным факторам, влияющим на структуру бетонного камня можно отнести применения различных марок цемента, различное содержание минеральных добавок в цементе, вариации марок бетонной смеси по удобоукладываемости, водоцементное отношение, изменения которого связаны с использованием цемента различной активности, а также с применением различных модифицирующих добавок. Таким образом в пределах одной и той же прочности можно получить конструкции с различной структурой, повышение водоцементного отношения приводит к увеличению пористости, а следовательно, и проницаемости, в то время как применение модифицирующих добавок позволяет получать бетонные смеси заданной пластичности с уменьшением количества используемой воды, что приводит к более плотной структуре бетонного камня. Что касается технологического аспекта, важную роль играют способы уплотнения бетонной смеси и условия твердения.

Для определения прочностных характеристик бетона был выбран метод неразрушающего контроля (метод пластических деформаций – с помощью молотка Кашкарова), так как при проведения предварительных испытаний данный метод показал наибольшую погрешность в сравнении с другими методами неразрушающего контроля (ультразвуковым, ударного импульса). Расположение и диаметр арматуры в железобетонных конструкциях определялись электромагнитным методом с помощью прибора ИЗС-10Н согласно ГОСТ 22904-93 [5].

Для определения влияния погрешностей приборов, используемых при испытаниях железобетонных конструкций методами неразрушающего контроля, при расчете изгибающего момента в расчет принимались наименьшее из полученных значений. Выполнялось сравнение полученных изгибающих моментов с теоретическим значением изгибающего момента, принимаемым для испытываемой серии плит.

Расчет изгибающих моментов выполнялся в программном комплексе Beta 4.2.

Анализ полученных результатов показал, что значительное влияние на несущую способность конструкции оказывают прочностные параметры арматуры, в то время как параметры бетона не дают значительных изменений. Таким образом, при использовании методов неразрушающего контроля с учетом погрешностей приборов можно определить несущую способность конструкции. Однако отклонения значений от серийного составляют от 4.1% до 27.7%, в зависимости от используемых приборов. Стоит учесть, что в расчете принимались максимальное и минимальное значения, полученные на приборах неразрушающего контроля, на практике же при проведении испытаний методами неразрушающего контроля следует проводить серию испытаний с последующим осреднением результатов, что позволяет минимизировать влияние выпадающих значений и более точно определить исследуемый параметр.

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Выведена зависимость «прочность-твердость» на образцах класса S800, которая при проверке на образцах классов S540 и S600 показала достаточную сходимость. Результат измерения с учетом расширенной неопределенности можно представить в виде:

$$\sigma_B = (15HR + 570) \pm 5 \text{ при } p = 0,7973.$$

2. Оптимальной глубиной среза для определения временного сопротивления для диаметров 10, 12, 14 мм является шлиф 2 мм. Однако, необходимо дополнительное исследование для арматурных стержней больших диаметров.

3. При обследовании изгибаемых элементов особое внимание необходимо уделить прочностным характеристикам арматуры, так как они оказывают наиболее существенное влияние на несущую способность. Допустимая нагрузка на конструкцию, полученная с использованием приборов неразрушающего контроля дают сопоставимые результаты при сравнении с рекомендуемыми в сериях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Улыбин, А.В. Методы контроля параметров армирования железобетонных конструкций / А.В. Улыбин // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 1 (27).
2. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий. – М.: АО "ЦНИИ-ПРОМЗДАНИЙ", 1997. – 179 с.
3. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности : ГОСТ 17624-2012.
4. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля : ГОСТ 22690-88.
5. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры : ГОСТ 22904-93.
6. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия : ГОСТ 22761-77.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНЫХ ПРОСЛОЕК, МОДИФИЦИРОВАННЫХ СТАХЕМЕНТ 2000М, В СОСТАВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

К.А. Костюрина, Е.Г. Кремнева

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: k.kostyurina@psu.by

*Рассматривается актуальность использования составных конструкций. Обозначается проблема надёжного сцепления элемента в зоне контактного шва составных железобетонных конструкций. Проводятся исследования прочности контактного шва старого бетона с бетоном намоноличивания, с использованием гиперпластификатора СТАХЕМЕНТ-2000М в прослойке на основе цементных систем. Делаются выводы по данным полученных результатов.*

*Ключевые слова: составные железобетонные конструкции, прочность контактного шва, сцепление, прослойки, модифицирующие добавки, гиперстификаторы, Стахемент 2000М.*

## APPLICATION OF CEMENT-SAND SPRAYS MODIFIED BY STAKHEMENT 2000M IN COMPOSITE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

K. Kostyurina, E. Kremneva

Polotsk State University, Belarus

email: k.kostyurina@psu.by

*The urgency of using composite structures is considered. The problem of reliable adhesion of the element in the zone of the contact seam of composite reinforced concrete structures is indicate. Research is conduct on the strength of the contact seam of old concrete with concrete namo-nochnichivaniya, using hyperplasticizer Stachement-2000M in a layer based on cement systems. Conclusions are drawn from the results obtained.*

*Keywords: composite reinforced concrete structures, contact strength, adhesion, interlayer, modifying agents, hyperplasticizers, Stachement-2000M.*

Вопрос качественного сцепления составных конструкций является весьма актуальным и перспективным практически во всех отраслях народного хозяйства, таких как машиностроение, металлообработка, химическая промышленность, медицина, строительство и многие другие. Что касается строительной отрасли и использования наиболее распространенного материала в строительстве - бетона, то здесь составные конструкции находят широкое применение как в новом строительстве (монолитном и сборном, сборно-монолитном строительстве), так и при реконструкции зданий и сооружений.

Особое внимание в составных бетонных и железобетонных конструкциях уделяется надёжному сцеплению слоев, а именно прочности контактного шва.

Недостаточное сцепление в шве может привести к полному нарушению связи между частями конструкции и привести к преждевременному образованию трещин, снизить водонепроницаемость конструкций и ускорить их разрушение.

Имеется достаточно много экспериментальных и теоретических работ по изучению сцепления нового бетона со старым. [2–4, 6, 7]. Предлагаются новые конструктивные ре-

шения, материалы, уточняются технологические параметры для обеспечения прочности и надежности работы всей составной конструкции.

Прочность контактного шва старого и нового бетона определяется многими факторами, такими как характер действия сил, условия укладки нового бетона, степень и методы уплотнения, уход за свежесуложенным бетоном, подготовка поверхности старого бетона, состав бетонной смеси и многое другое. Комплексное решение задачи по увеличению прочности контактного шва возможно только при совместном учете материаловедческих, технологических и конструкторских мероприятий.

Одним из основных факторов, влияющих на прочность шва, является тщательная подготовка поверхности старого бетона, которая требует значительных затрат. Важную роль в обеспечении прочности сцепления бетонов играет водоцементное отношение бетонной смеси. Использование малоподвижных и жестки смесей может пагубно сказаться на надежности контакта, так как даже при применении виброуплотнения сложно добиться сплошности в зоне контакта. Применение литых смесей также не рекомендуется из-за значительной разности усадки бетонов, что приводит к нарушению адгезионных связей и уменьшению сцепления. Наиболее оптимальным решением является применение подвижных бетонных смесей, что благоприятно сказывается на прочности контактного шва. [1].

На сегодняшний день в большинстве случаев хотя бы один элемент составной конструкции модифицирован химическими добавками. Изучению концентрации той или иной химической добавки и ее влияния на сцепление посвящено достаточно много работ, выполненных на базе Полоцкого государственного университета, Брестского государственного технологического университета, НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, Криворожского национального университета и пр. [1, 4, 5, 6]. Однако не ясно, каким образом модифицирующие добавки могут повлиять на прочность контактного шва. Так в работе [1] изучалось применение добавки С-3, а в [4, 5, 6] добавок СПС и Стахемент 2000М, при этом показано, что при определенных концентрациях модификаторов, прочность контактного шва может значительно возрасти.

Для больших объемов работ применение модифицирующих добавок может оказаться весьма затратным, так как стоимость модифицированных бетонов выше стоимости обычных бетонов. Применение прослоек на основании модифицированных цементных систем может сократить затраты на модификатор, а также позволит решить вопросы с уменьшением усадки бетона в зоне контактного шва.

Известны исследования с нанесением на поверхность старого бетона цементного раствора, цементного теста и посыпка поверхности контакта цементом [7]. Результаты работ К.Хагера и И. Неининга [7] показали, что присыпка цементом по смоченной поверхности снизила прочность сцепления, в то время как нанесение на поверхность цементного раствора резко повысило прочность сцепления. Так же нанесение на поверхность цементного раствора непосредственно перед укладкой нового бетона встречается в опытах Р. Девиса [7]. Данные исследования подтверждают целесообразность применения прослоек на основе цементных систем.

В Полоцком государственном университете проводились экспериментальные исследования, одной из задач которых являлось определение влияния прослоек на основе цементных систем, в том числе модифицированных гиперпластификатором Стахемент 2000М, на прочность контактного шва составной железобетонной конструкции. Общая схема испытаний образцов представлена на рисунке 1.

Для решения данной задачи были созданы 4 серии образцов. Серии отличались количеством модификатора в прослойке. В таблице 1 приведены данные по количеству модификатора в сериях.

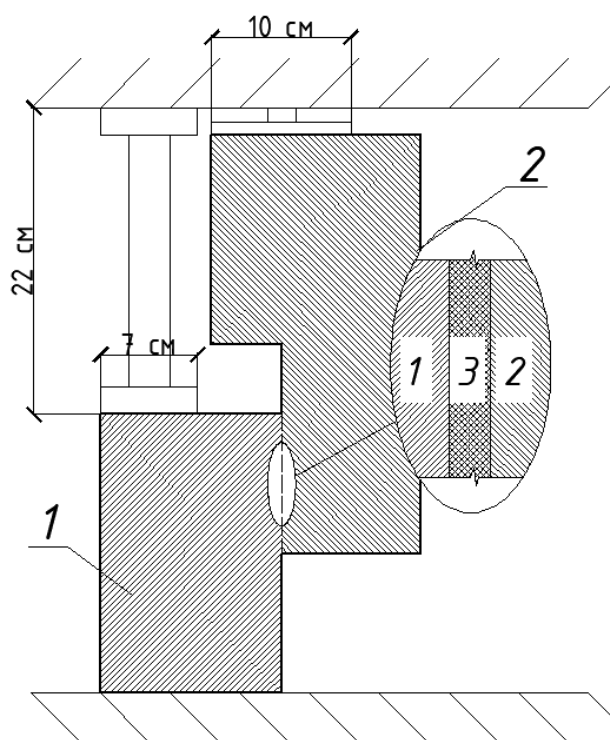


Рисунок 1. – Схема испытаний:  
1 – старый бетон; 2 – бетон намоноличивания; 3 – прослойка

Таблица 1 – Серии образцов

№серии	Маркировка	Количество модификатора в прослойке
Серия 1	Г-0-0	образцы без прослойки
Серия 2	Г-1-0	образцы с прослойкой без модификатора
Серия 3	Г-1-0,4	образцы с модифицированной прослойкой (модификатор 0,4% от массы цемента);
Серия 4	Г-1-0,7	образцы с модифицированной прослойкой (модификатор 0,7% от массы цемента).

По характеру работы под нагрузкой все испытываемые образцы не отличались между собой. Разрушение во всех случаях носило резкий, внезапный характер и заключалось в отделении одной части образца от другой по плоскости среза. Стоит отметить, что разрушение образцов серий 2–4 произошло по поверхности старого бетона и прослойки, а бетон намоноличивания и прослойка в составной конструкции работали монолитно. Количество налипших частиц на поверхности старого бетона, после разрушения образцов, также отличалось в зависимости от концентрации модификатора в прослойке, и в серии 4 была максимальной.

На основании полученных результатов было сделано заключение о том, что применение прослоек на основе модифицированных цементных систем увеличивает прочность контактного шва примерно на 40% в зависимости от концентрации добавки (рис. 2). Наиболее надежную совместную работу составных бетонных элементов обеспечивает применение цементно-песчаной прослойки с концентрацией добавки в размере 0,7% от массы цемента. Прочность контактного шва образцов с оптимальной концентрацией по сравнению с образцами без прослойки увеличилась в 1,87 раза, т.е. на 46,5%.

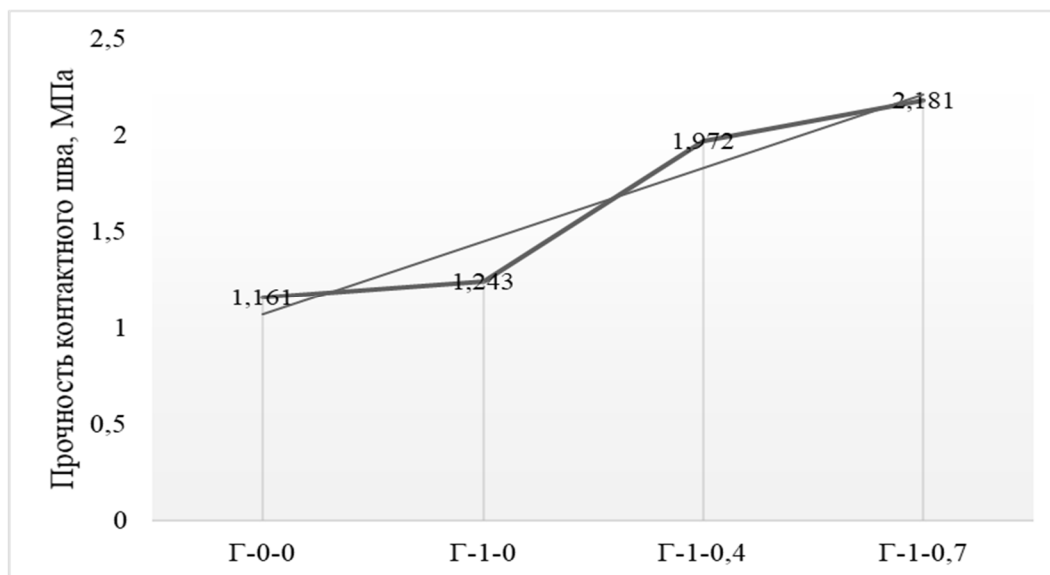


Рисунок 2. – Влияние гиперпластификатора Стахемент 2000М на прочность контактного шва

Г-0-0 – образцы без прослойки; Г-1-0 – образцы с прослойкой без модификатора;  
 Г-1-0,4 – образцы с модифицированной прослойкой (модификатор 0,4% от массы цемента);  
 Г-1-0,7 – образцы с модифицированной прослойкой (модификатор 0,7% от массы цемента).

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

- Стахемент 2000М в составе прослойки повышает прочность контактного шва примерно на 40% в зависимости от дозировки;
- ввод добавки в размере 0,7% от массы цемента повышает прочность контактного шва в среднем на 46,5% по сравнению с образцами без прослойки, и на 43% по сравнению с образцами с не модифицированной прослойкой;

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Юкневечюте, Я.А. Предложения по расчету усиления изгибаемых и сжатых конструкций, находящихся под нагрузкой, для пособия по проектированию железобетонных конструкций при реконструкции» / Я.А. Юкневечюте, В.А. Клевцов, В.М. Богачюнас. – НИИЖБИ, 1980.
2. Ремонт поврежденных поверхностей бетонных и железобетонных изделий / А.Г. Доля [и др.]. – Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ООО «ВП Мост», ГП «Научно исследовательский институт строительных конструкций». 2010.
3. Бугаев, В.А. Особенности восстановления зданий и сооружений специального назначения / В.А. Бугаев, Д.В. Горидько. – ВНУ им. В. Даля, ПГАСА, 2005.
4. Чикалина, О.П. Усиление железобетонных конструкций намоноличиванием с применением модифицированных бетонов : автореф. дис. ... магистра техн. наук : 05.23.01 / О.П. Чикалина. – Новополоцк, 2003.
5. Хаменок Е.В. Особенности подготовки контактных швов в строительстве / Е.В. Хаменок // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Строительство. – 2007. – Вып. № 22.
6. Калитуха, В.В. Прочность контактного шва железобетонных составных конструкций : автореф. дис. ... маг. техн. наук / В.В. Калитуха. – Новополоцк, 2017.
7. Гвоздев, А.А. Изучение сцепления нового бетона со старым в стыках железобетонных конструкций и рабочих швах / А.А. Гвоздев, А.П. Васильев, С.А. Дмитриев. – М. : ОНТИ, 1936.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЕРОБЕТОНА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

*И.В. Лазовская*

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: i.lazouskaya@psu.by

*Приводятся аналитические предпосылки перспективности применения строительных материалов на основе серного вяжущего в строительной отрасли Республики Беларусь. Представлены характеристики, положительные и отрицательные свойства, а также возможные области для применения серобетонов и других материалов на основе серного вяжущего в строительстве.*

*Ключевые слова: серобетон серное вяжущее, бетон, побочные продукты нефтепереработки*

## PERSPECTIVE AREAS FOR THE USE OF SULFUR CONCRETE IN THE BUILDING INDUSTRY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

*I. Lazouskaya*

Polotsk State University, Belarus

email: i.lazouskaya@psu.by

*This article presents analytical prerequisites for the prospects of using new building materials based on sulfur binder in the construction industry of the Republic of Belarus. The characteristics, positive and negative properties, as well as possible areas for the application of sulfur-concrete and other materials based on sulfur binder in construction are presented.*

*Keywords: sulfur concrete, sulfuric binder, concrete, by-products of oil refining.*

Одной из актуальных задач стройиндустрии Республики Беларусь является совершенствование существующих и разработка новых строительных материалов и изделий. Одним из требований, предъявляемым к строительным материалам, является устойчивость по отношению к значительному спектру различного вида агрессивных воздействий в течении длительного периода времени без потери технических характеристик. Одним из путей решения данной задачи может быть создание новых материалов, которые будут превосходить по многим характеристикам и свойствам известные. Отрасли нужны новые материалы и изделия из них, которые возможно использовать при строительстве объектов при наличии жестких агрессивных условий в тех областях строительства, где использование традиционных материалов и изделий при длительной эксплуатации требует дорогостоящих и регулярных восстановительных ремонтных работ.

Однако, кроме разработки новых материалов для промышленного и гражданского строительства Республики Беларусь, в стране обозначена твердая тенденция к охране окружающей среды и рациональному использованию отходов промышленного производства. Использование побочных продуктов нефтепереработки в качестве сырья для строительной отрасли является возможной и приоритетной задачей не только с научно-технической, но и с экологической точек зрения.



В качестве одного из наиболее перспективных направлений в разработке новых строительных материалов можно отметить использование в качестве вяжущего компонента серы как побочного продукта переработки нефти и газа [1–3].

Сера как химическое вещество не является токсичным, однако избыток ее производства как побочного продукта нефтепереработки ведет к увеличению складских запасов. Длительное хранение существенных объемов серы нежелательно, так как сопровождается снижением качественных ее характеристик как продукта, а также увеличением экологического риска для окружающей среды (ввиду чего надо написать). Сера является обязательным побочным продуктом нефтепереработки, и ее количество будет возрастать по мере увеличения объемов и повышения глубины переработки нефти. В таких условиях актуальной задачей является расширение областей использования серы в наукоёмких технологиях.

В Беларуси, в том числе в нашем регионе (Витебская обл., Новополоцк) на промышленном нефтеперерабатывающем предприятии ОАО «Нафтан» в ближайшее время также прогнозируется избыток серы. Это связано с углублением переработки нефти, а также с увеличением объемов производства кокса. Такая ситуация приведет к тому, что вырастут объемы сероводорода, переработка которого на строящейся установке замедленного коксования позволит утилизировать сероводород по методу «Клауса» и получить новый вид продукции - элементарную серу. В год планируется выпускать более 68,7 тыс. т твердой серы. Предполагаемый выпускаемый объем серы определяет необходимость поиска новых направлений её использования, среди которых разработка новых строительных материалов на основе серного вяжущего.

Одним из композиционных материалов, в состав которого входит серное вяжущее, инертные наполнители и заполнители является серобетон. В серобетоне в сравнении с традиционными тяжелыми бетонами спектр применения инертных наполнителей и заполнителей довольно широк. В роли крупного заполнителя зачастую выступает искусственный или природный щебень пористой или плотной структуры. Максимальная величина зерен зачастую не превышает 40 мм. В роли инертных наполнителей, служащих структурообразователями, чаще всего выступают тонкодисперсные материалы с величиной зерен менее 0,15 мм. Вяжущим в материале может выступать не только техническая либо элементарная сера, но и серосодержащие отходы различных промышленных производств. Композиционные материалы на основе серного вяжущего, в зависимости от сочетания инертных заполнителей по размерам фракции, могут быть изготовлены в виде бетонов, растворов или мастик.

Так как основным отличием серобетона от традиционного бетона на основе портландцемента является наличие серы в составе, то считаем необходимым упомянуть об ее свойствах. Сера является одним из самых распространенных неметаллов в природе. Как химический элемент, сера способна соединяться практически со всеми другими химическими элементами. Сера и ее соединения могут встречаться в природе во всех агрегатных состояниях вещества (твердом, жидком и газообразном. В настоящее время выделено более тридцати аллотропов серы, большинство из них недостаточно изучены, и пока еще отсутствует их единая классификация. Из полиморфных аллотропов, содержащих от десятков до сотен тысяч атомов в молекуле, наиболее изучены около десяти, в том числе: ромбической (плотностью  $2,07 \text{ г/см}^3$ ), моноклинной (плотностью  $1,97 \text{ г/см}^3$ ) и пластической. В твердой фазе сера является хрупким материалом, в результате чего затвердевший состав серобетона не покажет достаточной прочности. Поэтому для получения качественных, существенно повышающих механические свойства материалов и изделий на основе серного вяжущего, используют модификаторы. В зависимости от эксплуатационных требований и технологии производства серобетона модификацию серы

проводят специальными химическими присадками, которые вводят в момент расплава серы, тем самым регулируя свойства не только жидкой смеси, но и твердого материала.

Технологической особенностью производства серобетонов, является метод их получения по, так именуемой, «горячей» технологии. При этом, в процессе производства бетона все компоненты смеси нагреваются до 150°C. При таком режиме сера переходит в жидкое состояние (температура плавления 120°C). Расплав серы в растворе выполняет все функции вяжущего, определяющего главные технологические параметры композиций (удобоукладываемость, подвижность). Жизнеспособность смесей в горячем состоянии практически не ограничена [4, 5].

В настоящее время в Беларуси сложилась достаточно благоприятная ситуация на рынке строительных материалов для внедрения изделий на основе серного вяжущего, а дисбаланс производства и потребности цемента позволит серному бетону успешно конкурировать не только с полимербетонами, но и с бетонами на портландцементе. Использование серы в стройиндустрии Беларуси может являться экономически выгодным направлением. Перспективность и выгодность производства указанных материалов полностью обоснованно комплексом их положительных свойств в сравнении с бетонами на портландцементе.

Исходя из таких преимуществ как высокая прочность, которую обеспечивает готовым изделиям серобетон, короткий срок набора марочной прочности и возможность повторной переработки, по отношению к цементному аналогу, можно выделить сферы его использования: сборные бетонные конструкции (фундаментные плиты, бордюры, плиты для покрытия полов и дорог, сборные элементы для канализаций и портовых сооружений, ж/д и трамвайные шпалы, столбы ЛЭП и т.д.). Высокая устойчивость к воздействию кислот, солей, прочих химических элементов и соединений, а также устойчивость к истиранию и коррозии, позволяет использовать серобетон для строительства дорог (аэропорты, дороги в районах с низкими температурами), бетонных полов (химические заводы, пищевые производства), инженерных сооружений (элементы коллекторов, трубы, элементы смотровых колодцев, элементы очистных сооружений и др.).

Стоит отметить, что бетоны на основе серного вяжущего, в сочетании с высокими эксплуатационными характеристиками, многообразием цветовых решений, высоким качеством лицевой поверхности и широким диапазоном фактуры, отвечают высоким эстетическим требованиям и могут применяться для декоративного оформления. Составы обладают художественной выразительностью и возможностями для воплощения авторских замыслов в образно-художественных решениях путем передачи природной красоты структуры материала. Материал может применяться для оформления декоративных элементов фасадов зданий, архитектурно-лепного декора, художественного литья, элементов благоустройства, декоративных ограждений, элементов фонтанных композиций, реставрационных работ и ряда других направлений.

Потребителями серобетона могут быть организации, осуществляющие работы по дорожному строительству, благоустройству, индивидуальному строительству, гидроизоляции, кровельным покрытиям, химической (кислотной) защите, подземным сооружениям, фундаментам.

В выгодном положении находятся области Республики Беларусь, в которых расположены нефтеперерабатывающие производства, где сера получается в качестве побочного продукта, а, следовательно, актуальным является создание сопутствующих производств по получению новых материалов, изделий и конструкций на основе серного вяжущего. Это поможет решить не только вопрос улучшения экологической обстановки, но и позволит использовать в стройиндустрии Беларуси новые долговечные, высокопрочные материалы и изделия на их основе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов, А. Серобетон / А. Анисимов // Строительная газета. – 1995. – № 34. – С. 4.
2. Боженков, П.И. Использование отходов промышленности в строительстве // Материалы к семинару, Ленинград, 17–19 сент. 1978 / ЛИСИ ; под ред. П.И. Боженкова. – Л., 1978, – 104 с.
3. Возможности применения серы при производстве новых строительных материалов и изделий : науч.-техн. докл. / Л.М. Вользон [и др.]. – М., 1999. – 74 с.
4. Орловский, Ю.И. Бетоны и изделия на основе серосодержащих отходов / Ю.И. Орловский // Бетон и железобетон. – 1990. – № 1. – С. 24–26.
5. Орловский, Ю.И. Бетон и изделия на основе серосодержащих отходов / Ю.И. Орловский, А.С. Семченков, В.И. Хоржевский // Бетон и железобетон. – 1995. – № 3. – С. 21–24.

УДК 678.643.42.5:667.6:620.18

**АНТИКОРРОЗИОННАЯ ТЕРМОСТОЙКАЯ ЦИНКНАОЛНЕННАЯ ГРУНТ-ЭМАЛЬ  
НА ОСНОВЕ ЭТИЛПОЛИСИЛИКАТА, МОДИФИЦИРОВАННОГО  
НАНОУГЛЕРОДНЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

<sup>1</sup>Е.В. Шинкарева, <sup>2</sup>П.И. Статкевич, <sup>2</sup>С.Н. Леонович, <sup>2</sup>Н.А. Будревич

<sup>1</sup>Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск  
email: schinkarova@igik.bas\_net.by

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск  
email: pavelstatkevich@gmail.com, snleonovich@yandex.ru, nellibudrevich@yandex.by

*Показано, что окисление частиц цинковой пыли марки Zn-Dust начинается при достижении температуры 315°C, в присутствии Dynasytan MKS – ~450°C.*

*Изучены структурно-реологические свойства Dynasytan MKS и композиций на его основе с цинковой пылью, AEROSIL R 972 и углеродными нанотрубками марки НСУ-5. Предложен состав гидрофобной, антикоррозионной и термостойкой грунт-эмали. Представлены результаты исследования физико-химических свойств эмалевых покрытий.*

**ANTI-CORROSION THERMOSTENSION OF ZINCANOLENE GROUND-ENAMEL BASED  
ON THE ETHYLPOLYSILICATE, MODIFIED NANOUGHERN PARTICLES**

<sup>1</sup>E. Schinkarova, <sup>2</sup>P. Statkevich, <sup>2</sup>S. Leonovich, <sup>2</sup>N. Budrevich

<sup>1</sup>Institute of General and Inorganic Chemistry National Academy of Sciences, Minsk  
email: schinkarova@igik.bas\_net.by

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk  
email: pavelstatkevich@gmail.com, snleonovich@yandex.ru, nellibudrevich@yandex.by

*It is shown that the oxidation of Zn-Dust zinc dust particles begins when the temperature reaches 315°C, in the presence of Dynasytan MKS - 450°C.*

*Structural-rheological properties of Dynasytan MKS and compositions based on it with zinc dust, AEROSIL R 972 and carbon nanotubes of NSU-5 grade were studied. A composition of hydrophobic, anticorrosive and heat-resistant primer enamel is proposed. The results of the study of the physical and chemical properties of enamel coatings are presented.*

Цель работы – изучение возможности получения антикоррозионной термостойкой цинкнаолненной грунт-эмали на основе этилполисиликата, модифицированного наноуглеродными частицами, исследование процесса окисления частиц цинка при нагреве на воздухе в присутствии силикатного связующего и изучение физико-химических свойств покрытий.

**Экспериментальная часть.** В качестве связующего использовали этилполисиликат (эфир кремниевой кислоты) марки Dynasytan MKS (Evonik Industries AG) с массовым содержанием SiO<sub>2</sub>, равным 19.3%; металлического пигмента – цинковую пыль марки Zn Dust SF производства Eckart; наномодификатора – углеродные нанотрубки НСУ-5 (ГОСТ СТБ 1873-

2008) – количество структурированного углерода в материале – более 90%; средний размер трубок и волокон 10-20 нм; массовая доля графитоподобного углерода – 3-4%; массовая доля аморфного углерода – 3-7%; насыпная плотность –  $0.2 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ ; удельная адсорбционная поверхность –  $70\text{--}80 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ ; антиседиментационного агента, стабилизатора пигмента и антикоррозионной добавки - гидрофобный пирогенный диоксид кремния, поверхность которого обработана диметилдихлорсиланом (AEROSIL R 972, Evonik Industries AG). Содержание  $\text{SiO}_2$  –  $\geq 99.8\%$ , углерода – 0.6-1.2%, средний размер частиц - 16 нм, удельная их поверхность –  $110 \pm 20 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ .

Соотношение Dynasylan MKS : Zn : аэросила составляло 1 : 20 : 0.2 (в пересчете на сухое вещество). Наномодификатор вводили в количестве 0,2% (в пересчете на сухое вещество). Количество цинкового пигмента в композициях сохранялось постоянным.

Для изучения структуры образцов применялся сканирующий электронный микроскоп LEO 1420 и оптический металлографический микроскоп ММР-2Р. Термографические исследования проводили на приборе NETZSCH STA 409 PC/PG при скорости подъема температуры  $5^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$  и навеске 53.3 мг в атмосфере воздуха в интервале температур 20–900°C.

Структурно-реологические исследования образцов проводили на реометре Physica MCR 101 (Anton Paar Germany GmbH) с программным обеспечением Rheoplus с использованием измерительного устройства «пластина-пластина» с зазором между пластинами 0.05 мм.

Относительную твердость покрытий определяли с помощью маятникового прибора 2124 ТМЛ (Россия) по ГОСТу 5233-89, адгезию – методом параллельных надрезов по ГОСТу 15140-78, толщину сухого слоя лакокрасочного покрытия – по ГОСТу 6-10-403-77 с помощью магнитного толщиномера МТЦ-2М-4.

Стойкость покрытий к воздействию климатических факторов в условиях умеренно-континентального климата для эксплуатации ХЛ1, УХЛ1 тип атмосферы I (метод 3) – определяли в климатической испытательной камере КРК-800 3826/16. Один цикл испытаний включал: выдержку образцов при 40°C и относительной влажности 97% в течение 2 ч; при -30°C – 6 ч; при 15–30°C по режиму дождь – 5ч и без дождя – 5 ч; при -60°C – 4ч; при 15–30°C и относительной влажности 80% – 6 ч.

Электросопротивление покрытий измеряли при помощи комбинированного прибора тераомметра Е-6-13А. Удельное объемное сопротивление покрытий определяли расчетным путем [5].

В составе цинковой пыли присутствуют частицы шарообразной и овальной формы, НСУ-5 – округлой формы и нанотрубки, аэросила – агломерированные мелкодисперсные частицы. Данные рентгенофазового анализа наноуглерода НСУ-5 свидетельствуют о присутствии в нем графита,  $\text{Fe}_{0.94}\text{C}_{0.06}$  и  $\text{Fe}_{2.9}\text{O}_4$  [6].

На микрофотографии Dynasylan MKS, высушенного при 20°C, можно увидеть совокупность частиц овальной (близкой к округлой) формы, находящихся в затвердевшем каркасе.

По данным РФА Dynasylan MKS, высушенный при 20°C представляет собой аморфный диоксид кремния с весьма малой степенью кристалличности [номер фазы по каталогу ASTM 00-029-0085]. После термообработки этилполисиликата Dynasylan MKS в интервале температур 400-700°C, он становится рентгеноаморфным.

На электронно-микроскопических снимках высушенной при 20°C композиции, содержащей Dynasylan MKS и Zn, можно увидеть, что связующее обволакивает и хорошо смачивает поверхность частиц цинка, склеивая их между собой. В пленкообразующем покрытии отдельные частицы  $\text{SiO}_2$ . На микрофотографии образца, термообработанного при 400°C, поверхность частиц цинка укрыта коркообразным покрытием, в котором находятся

мелкодисперсные частицы диоксида кремния. При этом округлая форма частиц цинка сохраняется. В результате термообработки образца при 600°C, покрытие является плотным, монолитным, бездефектным, полностью обволакивающим частицы цинка.

ДТА-кривая Dynasylan MKS имеет один эндотермический эффект при температуре 91°C и три экзотермических эффекта различной интенсивности при температурах 291°C, 353°C, 572°C. Эндоэффект является суммирующим эффектом процессов, сопровождающихся выделением паров воды и органических составляющих, а также, вероятно, частичной термодеструкцией этилсиликатного геля. Потери массы в температурном интервале 20–260°C составляют 12.7%. Наиболее активно процесс термодеструкции Dynasylan MKS протекает в температурном интервале 260–640°C. При этом потери массы составляют 31.0%. Процесс термоокислительной деструкции протекает вплоть до температуры 900°C. Общие потери массы составляют 45.9%.

На кривой ДТА цинкового пигмента - эндотермический пик при температуре 414°C, который соответствует плавлению цинка [7]. Окисление цинкового пигмента начинается при температуре 315°C. Это подтверждается данными ТГ и ДТА. Так, в интервале температур 315–660°C наблюдаются два экзотермических пика с максимумами при температурах 327°C и 543°C. В данном температурном интервале, по-видимому, в результате плавления металла внутри частиц и объемного расширения расплава, происходит растрескивание оксидной пленки и непосредственный контакт расплава цинка с кислородом воздуха [8]. Прирост массы при достижении температуры 660°C составляет 21.3%. В температурном интервале 660–900°C окисление частиц металла лимитируется диффузией окислителя (кислорода воздуха) через образовавшуюся пленку ZnO на частицах цинка, которая становится плохо проницаемой для окислителя. Низкая проницаемость оксидной пленки на частицах цинкового пигмента подтверждается малой долей металла окислившегося при нагреве образца в температурном интервале 660–900°C - 0.3%.

Рентгенофазовым анализом как исходного цинкового пигмента, так и термообработанного при температурах 400°C, 500°C 600°C обнаруживается присутствие двух фаз – Zn и ZnO. В образце, термообработанном при 700°C, РФА обнаруживает только одну фазу – оксид цинка.

На кривой ДТА композиции, содержащей цинковую пыль и Dynasylan MKS, наблюдаются два эндотермических пика с максимумами при 84°C, 414°C и два экзотермических – при 304°C и 564°C. Потеря массы образца по достижении 450°C составляет 20.5%. На наш взгляд в области температур 450–900°C наблюдается два процесса – небольшое окисление цинка и дальнейшая термодеструкция этилполисиликатного связующего. В соответствии с ТГ, в температурном диапазоне 450–760°C прирост массы образца составляет 5.1%, – 760–900°C потери массы – 0.2%. Эндотермический пик при 414°C соответствует плавлению цинка.

Следует отметить, что в присутствии Dynasylan MKS процесс окисления частиц цинка начинается только при достижении 450°C, а не при 315°C, как это характерно для исходного образца цинкового пигмента. При этом и прирост массы образца меньше ≈ в 4.2 раза в сравнении с индивидуальным порошком.

В образце композиции цинковой пыли и Dynasylan MKS, высушенной при 20°C, обнаружена одна фаза – Zn, термообработанной в интервале температур 400–600°C – две фазы – Zn и ZnO, при 700°C – одна фаза ZnO. На всех рентгенограммах в диапазоне 20–30 2 $\theta$  присутствуют размытые пики, указывающие на присутствие фазы аморфного диоксида кремния.

На кривой ДТА композиции, содержащей цинковый пигмент и Dynasylan MKS, аэросил и нанодобавку, в интервале температур 460–740°C наблюдается уширенный экзотермический пик с максимумом при 650°C и два эндотермических пика при 84°C и 415°C. По-

теря массы образца по достижении 460°C составляет 18%, прирост массы в интервале температур 460-740°C – 4.8%, масса образца в интервале температур 740-900°C остается постоянной.

На микрофотографии данного образца, высушенного при 20°C, видно, что частицы цинка сопряжены между собой и их поверхность покрыта пленкой, включающей в себя паутиноподобные включения аэросила и нанодобавки, а также мелкие округлые частицы диоксида кремния.

На кривых вязкости проявляется участок I – пластического течения, характеризующийся течением структурирующегося раствора с постепенным переходом к участку II – течение ориентированных под действием механического поля анизотропных агрегатов. Связующее Dynasylan MKS и композиции на его основе являются структурированными жидкообразными системами, относящимися к неньютоновским жидкостям со значительным падением вязкости с увеличением скорости сдвига. Исходный Dynasylan MKS при  $D_r = 1 \text{ с}^{-1}$  характеризуется максимальной вязкостью ( $\eta_{max}$ ) не разрушенной структуры, равной 2.63 Па · с. Присутствие аэросила, наномодификатора или цинковой пыли в связующем повышает его вязкость при малых скоростях сдвига. Так, при  $D_r = 1 \text{ с}^{-1}$  для композиции Dynasylan MKS+цинковая пыль, характерно увеличение  $\eta_{max}$  до 9.19 Па · с; Dynasylan MKS+AEROSIL R 972 – до 12.09 Па · с; Dynasylan MKS+НСУ-5 - до 22.15 Па · с.

Наблюдается условный динамический (бингамовский) предел текучести  $P_{k2}$ , указывающий на коагуляционное структурообразование в системе, и критическое напряжение сдвига  $P_m$ , показывающее границу предельного разрушения структуры. Введение добавок в Dynasylan MKS повышает прочность структуры образованных композиций по сравнению с исходным связующим, о чем свидетельствует увеличение значений реологических характеристик  $P_{k2}$  и  $P_m$ . Более высокие значения  $P_{k2}$  композиций с добавками свидетельствуют об упрочнении структурного каркаса. По влиянию на прочность структуры этилполисиликата добавки располагаются в следующий ряд, где каждая последующая добавка упрочняет структуру меньше, чем предыдущая: НСУ-5 > AEROSIL R 972 > Zn.

Приготовление однокомпонентной грунт-эмали осуществлялось с помощью лабораторного диссольвера с фиксированной скоростью вращения фрезы 900 оборотов в минуту в металлической емкости. В ее рецептуре наряду со связующим, цинковой пылью, аэросилом, нанодобавкой использованы растворители (нефтяной сольвент и уайт-спирит).

Готовую композицию наносили кистью на предварительно обезжиренные растворителем Р5 металлические образцы из стали марки 3 кп по ГОСТ 9.083-78 размером 150x70x1 мм. Наблюдалось хорошее смачивание подложки. Степень отверждения при 20°C и относительной влажности не менее 35% однослойного покрытия «до отсутствия отлипа» достигалась через 1 ч, спустя 24 ч наносили второй слой. Толщина однослойного покрытия составляла 80 мкм, двухслойного – 160 мкм.

На поверхности покрытия образца после 115 циклов его испытаний в условиях умеренно-континентального климата наблюдаются изменения в виде отдельных светлых пятен, белая рыхлая ржавчина отсутствует, на поверхности металла под покрытием следы коррозии не выявлены.

Введение нанодобавки в композицию приводит к повышению твердости покрытий. Оптимальное время сушки покрытий при 20°C - 7 сут. Наибольшие значения твердости покрытия приобретают после их термообработки при 400°C в течение 1 ч, но при этом наибольшей твердостью характеризуются покрытия, содержащие нанодобавку.

Величина удельного объемного сопротивления покрытий зависит от их состава. Так, покрытия, сформированные на основе композиции, содержащей Dynasylan MKS, цинковую пыль и аэросил, характеризуются более высокими значениями удельного сопротивления по сравнению с покрытиями системы (Dynasylan MKS)-цинк-аэросил-нанодобавка. Терми-



ческая обработка покрытий существенного влияния на величину их сопротивления не оказывает.

Капли воды на двухслойном покрытии, высушенного при 20°C в течение 7 сут поверхности не растекаются по ней, наблюдается так называемый «эффект лотоса», возникший как следствие низкой смачиваемости поверхности.

#### Выводы:

1. Установлено, что окисление частиц цинковой пыли начинается при достижении температуры 315°C, в присутствии этилполисиликата Dynasylan MKS процесс их окисления несколько замедляется. В области температур 450-900°C наблюдается протекание двух процессов – термодеструкция связующего и небольшое окисление частиц цинка.

2. Установлено, что по влиянию на прочность структуры этилполисиликата добавки располагаются в следующий ряд, где каждая последующая добавка упрочняет структуру меньше, чем предыдущая: HCU-5 > AEROSIL R 972 > Zn Dust SF.

3. Предложен состав антикоррозионной, термостойкой грунт-эмали. Коррозии металла под покрытием после 115 циклов испытаний для эксплуатации ХЛ1, УХЛ1 не наблюдалось. Длительная термостабильность покрытий составляет не менее 400°C, кратковременная – до 600°C.

4. Присутствие в составе грунт-эмали нанодобавки способствует увеличению твердости покрытий и уменьшению их сопротивления. Покрытия устойчивы к действию дождя, наблюдается так называемый «эффект лотоса».

5. Цинкэтилсиликатная наномодифицированная грунт-эмаль является однокомпонентной, может применяться в условиях умеренно-континентального климата при температурных колебаниях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шинкарева, Е.В. Лакокрасочные материалы и их применение / Е.В. Шинкарева. – 2017. – № 3. – С. 68–78.
2. Успехи в химии и химической технологии / Д.Ю. Шитов [и др.]. – 2014. – Т. XXVIII. – № 3(152). – С. 83–85.
3. Успехи в химии и химической технологии / Д.Ю. Шитов [и др.]. – 2014. – Т. XXVIII. – № 3(152). – С. 86–88.
4. Херрверт, А. Лакокрасоч. материалы и их применение / А. Херрверт, А. Кенинг, М. Зименс. – 2014. – № 9. – С. 39–41.
5. Кузнецов, С.И. Краткий курс физики : учеб. пособие / С.И. Кузнецов, К.И. Рогозин. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. – 215 с.
6. Шинкарева, Е.В. Лакокрасоч. материалы и их применение / Е.В. Шинкарева. – 2017. – № 3. – С. 68–78.
7. Рабинович, В.А. Краткий химический справочник / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. – Л. : Химия, 1978. – С. 392.
8. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П.Ф. Похил [и др.]. – М. : Наука, 1972. – 294 с.

## ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ПЛИТНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ МХА СФАГНОВЫХ БОЛОТ

А. Бакатович, Флориндо Гаспар, М. Наумов

Полоцкий государственный университет, Беларусь

Политехнический институт г. Лейрии, Португалия

email: a.bakatovich@psu.by, florindo.gaspar@ipleiria.pt

*Предлагается использовать сфагновый мох в качестве основного компонента теплоизоляционного материала. Рассмотрены результаты исследований по определению плотности и теплопроводности утеплителей. Также учитывались усадочные деформации полученных образцов при подборе составов. Дополнительно для устранения усадочных деформаций при сушке вводили дробленый тростник или солому. Определены составы утеплителей с высокими физическими характеристиками на комплексном заполнителе на основе мха и соломы.*

*Ключевые слова: мох, тростник, солома, жидкое стекло, утеплитель, плотность, теплопроводность.*

## HEAT INSULATING PLATE MATERIAL BASED ON THE MOSS OF THE SPHAGNUM BOGS

A. Bakatovich, Florindo Gaspar, M. Naumov

Polotsk state University, Belarus

Политехнический институт г. Лейрии, Португалия

email: a.bakatovich@psu.by, florindo.gaspar@ipleiria.pt

*It is proposed to use sphagnum moss as the main component of a heat-insulating material. The results of studies on determination of density and thermal conductivity of heaters are considered. Shrinkage deformations of the obtained samples were also taken into account when selecting the compositions. In addition, crushed reed or straw was added to remove the shrinkage deformities during drying. The compositions of heaters with high physical characteristics on a complex aggregate based on moss and straw have been determined.*

*Keywords: moss, reed, straw, liquid glass, insulation, density, thermal conductivity.*

**Введение.** Опыт применения мха сфагнум в различных сферах известен с XI века. Наиболее эффективно мох применяется в медицине как перевязочное средство с антибактериальными свойствами [1] и в качестве биомониторов для оценки окружающей среды [2]. В традиционном строительстве мох применяется только для утеплителя построек из дерева.

Повышение экологической культуры заказчиков вынуждает строителей искать и предлагать теплоизоляционные материалы, обеспечивающие экологическую безопасность зданий. Разработка экологически чистого утеплителя на основе мха с бактерицидными свойствами в виде плит позволяет удовлетворить потребность в таком материале.

Важным аспектом использования природного растительного материала является возобновляемость сырья. Правильный сбор мха позволяет ускорить процесс роста и восстановления [3]. С целью получения мха с необходимыми свойствами и возможностью дальнейшего использования необходимо придерживаться определенных технологических правил в процессе сушки и хранения.

**Материалы и методы.** Плотность теплоизоляционных плит определяли в соответствии с ГОСТ 17177 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний».

Теплопроводность исследуемых материалов измеряли по СТБ 1618-2006 «Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме». Теплофизические свойства теплоизоляционных плит исследовали при помощи прибора «ИТП-МГ4 100».

**Экспериментальные исследования.** Для получения теплоизоляционных материалов на основе растительного сырья проведены комплексные исследования по подбору составов, включая подготовку заполнителя определенной фракции, исследованы основные физико-механические характеристики полученных образцов.

В экспериментальных исследованиях использовали однокомпонентный заполнитель из нарезанного мха или композиционный заполнитель, представляющий собой смесь из мха сфагнума с тростником обыкновенным или ржаной соломой. Натриевое жидкое стекло применяли в качестве связующего вещества. Использование мха, как заполнителя, обусловлено антисептическими свойствами и опытом использования в теплоизоляционных целях. Жидкое натриевое стекло обеспечивает теплоизоляционному материалу негорючесть, связывает заполнитель, является антисептиком и препятствует образованию грибков.

На предварительном этапе исследований в качестве заполнителя для получения теплоизоляционного материала использовали нарезанный мох фракцией 1-2 см. Формовку образцов-плит размером 250×250×30 мм производили под давлением 0,02 МПа. Образцы выдерживали в форме 5-6 часов, затем извлекали и в течение 6-7 часов высушивали в камере при температуре 40-50 °С. На полученных образцах-плитах определяли коэффициент теплопроводности и плотность (рис. 1, 2).



Рисунок 1. – Теплоизоляционная плита на основе мха



Рисунок 2. – Теплоизоляционная плита на основе мха и соломы

Результаты испытаний теплоизоляционного материала на основе мха представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Физико-механические характеристики плит на основе мха

№ состава	Масса образца, г	Расход компонентов на плитку, г			Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	Размеры образца, см
		мох	жидкое стекло	вода			
1	531	300	400	175	300	0,075	24,4×24,4×3
2	499	260	400	160	285	0,06	24,4×24,4×3
3	464	220	400	145	265	0,047	24,4×24,3×3
4	437	180	400	130	250	0,05	24,3×24,3×3
5	396	140	400	115	225	0,056	24,3×24,2×3
6	352	100	400	100	200	0,063	24,2×24,2×3
7	439	300	300	175	255	0,068	24,4×24,3×3
8	410	260	300	160	235	0,053	24,3×24,3×3
9	377	220	300	145	215	0,04	24,3×24,2×3
10	349	180	300	130	200	0,045	24,2×24,2×3
11	316	140	300	115	180	0,051	24,2×24,2×3
12	280	100	300	100	160	0,058	24,2×24,1×3
13	346	300	200	175	205	0,059	24,3×24,3×3
14	320	260	200	160	185	0,047	24,3×24,3×3
15	289	220	200	145	170	0,034	24,3×24,2×2
16	261	180	200	130	155	0,04	24,2×24,2×3
17	236	140	200	115	140	0,046	24,2×24,1×3
18	208	100	200	100	120	0,052	24,1×24,1×3

Из полученных данных таблицы 1 следует, что при фиксированном количестве вяжущего (например, 300 г), увеличение расхода заполнителя на 120 г (составы 9 и 12) ведет к повышению плотности на 26% и снижению коэффициента теплопроводности на 31%. Однако при дальнейшем увеличении расхода заполнителя с 220 до 300 г (составы 9 и 7) наблюдается возрастание коэффициента теплопроводности на 42% с 0,04 до 0,068 Вт/(м·°C). Повышение массы жидкого стекла так же приводит к увеличению показателя теплопроводности. Так, при сравнении характеристик составов 3 и 9 можно отметить, что добавление 100г связующего вызывает увеличение коэффициента теплопроводности на 15 % и плотности на 19 % при равном расходе заполнителя, а при сравнении составов 3 и 15 теплопроводность увеличилась на 28 %, а плотность на 37 %.

Таким образом, увеличение как расхода мха, так и жидкого стекла повышает коэффициент теплопроводности и плотность плит. Полученные зависимости объясняются тем, что при повышенном расходе жидкого стекла, слои связующего начинают выступать в качестве мостиков холода. По слоям связующего, покрывающих частицы заполнителя, начинает передаваться тепло. При низкой плотности утеплителя формируется рыхлая структура заполнителя, пропускающая через себя потоки теплого воздуха. При расходе мха 220 г удается достичь оптимальной уплотненной структуры, блокирующей свободное перемещение воздушных тепловых потоков сквозь утеплитель, обеспечивающей сохранение максималь-

ной целостности ячеистой микроструктуры. Дальнейшее повышение плотности теплоизоляционного материала приводит к смятию и уплотнению ячеистой микроструктуры, что вызывает разрушение стенок ячеек-клеток. В результате, несмотря на отсутствие сквозных потоков воздуха через структуру, повышаются теплопотери по материалу самого заполнителя. Наилучшие результаты по теплопроводности зафиксированы на составах 3, 9, 15 при разных расходах вяжущего, что обусловлено формированием оптимальной структурной системы из мха, блокирующей прохождение сквозных потоков воздуха через утеплитель. При этом внутренняя ячеистая микроструктура стволов и листьев мха остается максимально неповрежденной.

После термической обработки теплоизоляционных плит отмечается присутствие значительных усадочных деформаций по длине и ширине на 7-8 мм, что составляет около 6% от размеров формовки. При перемешивании с жидким стеклом вследствие гигроскопичности мха, вода попадает в мертвые клетки, что приводит к их разбуханию и увеличению в объеме. Таким образом, происходит увеличение размеров нарезанных фрагментов мха, обладающего значительным коэффициентом линейного расширения во влажном состоянии. В процессе сушки вода испаряется из мертвых гиалиновых клеток, и мох уменьшается в размерах, что приводит к появлению усадочных деформаций.

На втором этапе исследований с целью придания теплоизоляционному материалу большей жесткости и уменьшения усадки вводили дополнительный компонент в заполнитель – тростник обыкновенный в виде нарезанных трубок длиной 1-2 см. При попытке дробить стебель тростника на части длиной менее 1 см, материал терял свою цилиндрическую форму и разрушался на сегменты. Использование трубок тростника длиной более 2 см не целесообразно с позиции формирования необходимой жесткой связной структурной системы. В составе комплексного заполнителя трубки тростника должны создать каркас из прочных и связанных между собой дробленых частиц цилиндрической формы. Таким образом, полученный каркас из трубок тростника в составе основной массы мха позволит воспринимать сжимающие усилия и уменьшить усадочные деформации. За общую массу комплексного заполнителя принята масса мха в однокомпонентных составах 3, 9 и 15 (см. табл. 1) с наименьшими коэффициентами теплопроводности. Тростник вводили в количестве 20 – 50% от общей массы заполнителя.

Результаты испытаний теплоизоляционного материала на основе мха и тростника представлены в таблице 2. При рассмотрении составов с равным количеством связующего, установлено, что повышение расхода дробленого тростника ведет к увеличению коэффициента теплопроводности плит. Введение тростника в количестве 50% от общей массы заполнителя (состав 5) вызывает повышение коэффициента теплопроводности относительно показателя состава 8 на 33% с 0,045 до 0,06 Вт/(м·°C). Так же наблюдается возрастание показателя теплопроводности с увеличением количества связующего. Например, для составов 3 и 11 с равным расходом компонентов, увеличение массы жидкого стекла на 200 г (состав 3) привело к возрастанию показателя теплопроводности на 23%. В целом следует отметить, что показатели теплопроводности материалов на двухкомпонентной основе (табл. 2) выше, чем показатели однокомпонентных составов (см. табл. 1) при равном расходе компонентов смеси. Состав 12 с наибольшим количеством мха в заполнителе при плотности 166 кг/м<sup>3</sup> имеет коэффициент теплопроводности 0,041 Вт/(м·°C), что на 21% больше, чем показатель однокомпонентного материала с тем же количеством связующего (состав 15, табл. 1).

Таблица 2. – Физико-механические характеристики плит на основе мха сфагнума и тростника обыкновенного

№ состава	Масса образца, г	Расход компонентов на плиту, г				Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Соотношение мох : тростник, %	Размеры образца, см
		мох	тростник	жидкое стекло	вода				
1	426	110	110	400	100	228	0,068	50:50	25×24,9×3
2	426	132	88	400	115	231	0,059	60:40	24,8×24,8×3
3	425	154	66	400	130	234	0,054	70:30	24,6×24,6×3
4	423	176	44	400	145	235	0,05	80:20	24,5×24,4×3
5	359	110	110	300	75	194	0,06	50:50	24,9×24,8×3
6	358	132	88	300	90	195	0,053	60:40	24,8×24,7×3
7	359	154	66	300	105	198	0,049	70:30	24,6×24,5×3
8	357	176	44	300	130	200	0,045	80:20	24,4×24,4×3
9	293	110	110	200	75	160	0,053	50:50	24,7×24,7×3
10	294	132	88	200	90	163	0,047	60:40	24,7×24,6×3
11	295	154	66	200	105	165	0,044	70:30	24,5×24,3×3
12	294	176	44	200	130	166	0,041	80:20	24,3×24,3×3

Тростник обладает высокой насыпной плотностью – 270 кг/м<sup>3</sup>. В результате вводимое количество дробленого тростника в большинстве составов не обеспечивает формирование связанного жесткого каркаса необходимого для устранения усадочных деформаций плит. Кроме того, часть дробленых стеблей тростника в виде трубок расщепляется на сегменты в процессе формовки материала, что сокращает занимаемый частицами объем в плите и приводит к разуплотнению структуры мха. Так же отмечается неравномерное распределение дробленого тростника по массиву утеплителя. В результате формируются и свободно перемещаются воздушные тепловые потоки в структуре материала, что приводит к повышению коэффициента теплопроводности и снижению термического сопротивления. Наименьший показатель теплопроводности плит на двухкомпонентной основе равный 0,041 Вт/(м·°С) установлен у состава 12 при плотности 166 кг/м<sup>3</sup> с соотношением компонентов в смеси 80:20.

Устранить усадку плит удалось только в составе 1 с максимальным количеством связующего при соотношении мха и тростника 50:50. В остальных составах на основе смеси мха и тростника усадочные деформации уменьшились на 3-5 мм по сравнению с плитами из мха.

Так же в качестве второго компонента заполнителя использовали ржаную солому фракцией 1-2 см. Внешний вид плиты из смеси мха и соломы представлен на рисунке 2. Результаты испытаний теплоизоляционного материала на основе смеси мха и соломы представлены в таблице 3.

В ходе анализа полученных данных установлено, что изменения показателя теплопроводности от соотношения компонентов в смеси заполнителя и количества связующего аналогичны зависимостям утеплителя на основе смеси мха и тростника. Так, в составах 5 и 8 (табл. 3), при равной массе жидкого стекла, повышение количества соломы в составе приводит к возрастанию коэффициента теплопроводности на 30% с 0,043 Вт/(м·°С) до 0,056 Вт/(м·°С). В то же время, добавление 200 г связующего при равном соотношении компонентов в смеси заполнителя в составах 2 и 10, увеличивает плотность плит на 45% со 156 кг/м<sup>3</sup> до 226 кг/м<sup>3</sup>, а коэффициент теплопроводности до 0,058 Вт/(м·°С) на 32%. Так же установлено незначительное ухудшение теплоизоляционных свойств материала по отношению к составам с однокомпонентным заполнителем (см. табл. 1) и улучшение

показателей в сравнении с плитами на основе композиции из мха и тростника (см. табл. 2). Например, при максимальном количестве мха и расходе связующего 200 г (состав 12), коэффициент теплопроводности равен 0,037 Вт/(м·°C), что на 9% превышает показатель состава 15 (см. табл. 1) на основе мха и на 11% ниже показателя состава 12 (см. табл. 2) из смеси мха и тростника. При сравнении тростника и ржаной соломы в качестве компонентов в составе комплексного заполнителя следует отметить, что насыпная плотность соломы равна 125 кг/м<sup>3</sup>, что в 2,16 раз меньше, чем показатель тростника, соответствующий 270 кг/м<sup>3</sup>. При равных массах компонентов, солома занимает в 2 раза больший объем в смеси заполнителя. При формовке плит на основе смеси мха и соломы формируется жесткий связанный каркас из дробленых стеблей соломы с заполнением пустотного пространства плотной структурой из мха, препятствующей свободному движению воздушных потоков через структуру утеплителя. Полученная структурная система обеспечивает низкий коэффициент теплопроводности, высокую прочность и отсутствие усадочных деформаций при сушке. Так же солома обладает теплопроводностью 0,05 Вт/(м·°C), что на 23% меньше показателя тростника равного 0,065 Вт/(м·°C). Микроструктура соломы и тростника аналогична, однако тростник имеет большую плотность благодаря наличию более толстых перегородок за счет уменьшения размеров поперечного сечения ячеек. Разрушение полых цилиндрических частиц тростника на сегменты при формовании плит препятствует образованию внутренних локальных воздушных пустот в частицах, что так же уменьшает теплопроводность. Дробленые стебли соломы на всех технологических этапах производства теплоизоляционной плиты сохраняют свою цилиндрическую форму и свойства. После формовки воздушные полости в трубках по торцам закрываются уплотненным мхом и циркуляция воздуха через пустоты не происходит. Кроме того, отсутствует разрушение ячеистой структуры капилляров соломы, так как не происходит деформации трубок дробленых стеблей при формовке, что способствует повышению сопротивления теплопередаче.

Таблица 3. – Физико-механические характеристики плит на основе мха сфагнума и ржаной соломы

№ состава	Масса образца, г	Расход компонентов на плиту, г				Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	Соотношение мох : солома, %	Размеры образца, см
		мох	солома	жидкое стекло	вода				
1	423	110	110	400	100	225	0,063	50:50	25×25×3
2	425	132	88	400	115	226	0,058	60:40	25×25×3
3	426	154	66	400	130	227	0,054	70:30	25×25×3
4	424	176	44	400	145	226	0,051	80:20	25×25×3
5	358	110	110	300	75	191	0,056	50:50	25×25×3
6	359	132	88	300	90	192	0,05	60:40	25×25×3
7	357	154	66	300	105	190	0,046	70:30	25×25×3
8	358	176	44	300	130	191	0,043	80:20	24,8×24,8×3
9	294	110	110	200	75	157	0,049	50:50	25×25×3
10	292	132	88	200	90	156	0,044	60:40	25×25×3
11	290	154	66	200	105	155	0,04	70:30	24,8×24,8×3
12	293	176	44	200	130	156	0,037	80:20	24,7×24,6×3

При использовании смеси мха с соломой наблюдались существенные изменения в снижении усадочных деформаций. Усадка плит в процессе сушки в продольном направлении отмечалась в составах с наименьшим количеством соломы и связующего в составах 8, 11, и 12 и составляла 2-3 мм от размеров при формовке. На плитах остальных составов



усадочные деформации не зафиксированы. Наименьший коэффициент теплопроводности равный 0,044 Вт/(м·°C) при отсутствии усадки плиты установлен у состава 10 (см. табл. 3). Так же наблюдалось уменьшение плотности материала по сравнению с плитами на основе смеси мха и тростника, что объясняется сохранением первоначальных размеров плит при одинаковой массе компонентов после сушки. Так, плотность состава 8 (см. табл. 3) составила 191 кг/м<sup>3</sup>, что на 9 кг/м<sup>3</sup> меньше показателя состава 8 (см. табл. 2).

Большой объем соломы относительно занимаемого тростником пространства, сохранение геометрии дробленых стеблей в виде полых цилиндров-трубок позволили создать в структуре мха равномерно распределенный связный каркас из соломы, воспринимающий сжимающие усилия при нагрузке и препятствующий появлению усадочных деформаций. Так же по причине большего объема, заполняемого соломой в составе композитного заполнителя, наблюдается уплотнение мха до структуры аналогичной составам 3, 4, 9, 10, 15, 16 (см. табл. 1). Приведенные факторы обуславливают отсутствие усадочных деформаций теплоизоляционных плит при сушке.

Необходимо отметить, что на образцах-кубиках из смеси мха и тростника зафиксированы те же недостатки, что и у плит на однокомпонентном заполнителе: рыхлая волокнистая структура мха, отсутствие связного каркаса из тростника, усадочные деформации после сушки. Меньший объем тростника по сравнению с соломой при одинаковой массе, разрушение трубок тростника при формовке, менее плотная структура образцов и отсутствие связного каркаса являются факторами, обуславливающими меньшую прочность относительно материала из смеси мха и соломы. На образцах из смеси мха и соломы (см. табл. 3) указанные негативные факторы отсутствуют, что в результате позволяет достичь более высоких прочностных характеристик.

#### **Заключение.**

1. Теплоизоляционные плиты на однокомпонентной основе из мха сфагнума обладают низким коэффициентом теплопроводности равным 0,034 – 0,04 Вт/(м·°C). Однако материалу присущи недостатки в виде усадочных деформаций при сушке.

2. Изменение расхода заполнителя и натриевого жидкого стекла оказывает существенное влияние на свойства теплоизоляционного материала. Увеличение расхода связующего и заполнителя негативно сказывается на коэффициенте теплопроводности, вызывая повышение показателя.

3. Присутствие соломы в композиции позволяет устранить усадочные деформации при незначительном увеличении коэффициента теплопроводности. Оптимальными составами с отсутствием усадочных деформаций, являются двухкомпонентные составы 7 и 10 на основе мха сфагнума и ржаной соломы, обеспечивающими коэффициент теплопроводности 0,044 - 0,046Вт/(м·°C) при плотности 156-190 кг/м<sup>3</sup>.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Емельянова, А.П. Выявление природно-климатических факторов, влияющих на содержание химических элементов в сфагновых мхах / А.П. Емельянова, Е.А. Шмелина, С.В. Алексеенко. – Томск : Том. политехн. ун-т, 2012. – 98 с.
2. Боженко, Н.П. Особенности использования мхов в биомониторинговых исследованиях / Н.П. Боженко. – Томск : Нац. исследоват. Том. политехн. ун-т, 2014. – 2 с.
3. Интернет портал [Электронный ресурс] / Мох сфагнум. Свойства, заготовка, применение. – Режим доступа: <http://www.liveinternet.ru/users/651596/post345071054> – Дата доступа: 12.03.2018.

## RESEARCH OF FLY ASH AND SLAG (BOTTOM ASH) FROM MUNICIPAL WASTE INCINERATION. THE POSSIBILITIES OF SECONDARY USE

<sup>1</sup>V. Voišniene, <sup>2</sup>O. Kizinievic

<sup>1</sup>Department of Chemistry and Bioengineering, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania  
email: violeta.voisniene@vgtu.lt

<sup>2</sup>Laboratory of Composite Materials, Institute of Building Materials, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania  
email: olga.kizinievic@vgtu.lt

*Incineration of MSWI allows a great reduction in the quantity of the wastes of 65–80% in mass and 85–90% in volume. Nevertheless, several residues, with different characteristics of hazard, remain after the incineration. They can be broadly divided into bottom ashes (slag) and fly ashes. MSWI fly ash are fine and are normally characterized by a high content of chlorides (NaCl, KCl, CaCl, KCaCl) even higher than 10-15%) and significant amounts of dangerous substances (As, Pb, Cr, Cu, Hg) such as heavy metals ). MSWI bottom ashes (slag) have coarser dimensions (particles can reach several tens of millimeters in size), and the amount of chlorides and hazardous chemicals is usually much lower than that of MSWI fly ash.*

*Keywords: MSWI, hazardous waste, fly ash, bottom ash (slag), heavy metals, chloride.*

Concerns about the large volume of fly ash and bottom ash generated by the incineration of municipal solid waste (MSW) have induced the scientific community to seek ways to reduce their environmental impact.

Incineration is one of the alternatives for managing municipal solid waste (MSW). Given the steep rise in MSW generation, the number of incinerators in developed countries is expected to grow steadily, with a concomitant increase in the amount of bottom and fly ash. Although some 46% of MSW incinerator ashes in Europe is re-used, billions of tonnes remain which must be treated to prevent subsequent environmental problems [1]. Although incineration could significantly reduce the waste volume by approximately 85–90% [2] and provide usable energy, it is still imperfect for MSW disposal. One of the main concerns for MSW incineration is the generation of potentially hazardous residues such as fly ash. The weight of fly ash from MSW incineration (MSWI FA) is up to 2–5 wt% of the original MSW [3]. MSWI FA is usually considered as a hazardous waste due to its high content of toxic substances (e.g., heavy metals, dioxins, and furans).

Haiying et al. [4] investigated the utilization of municipal solid waste incineration fly ash in production of clay bricks. It was found that the optimal mixture ratio of materials, fly ash: red clay: feldspar: sand, was 20:60:10:10, and the optimal sintering temperature was 950 °C. The results as a whole suggested that utilization of fly ash in production of clay bricks constituted a potential means of recycling municipal solid waste incineration fly ash.

Lin [5] studied the utilization of municipal solid waste incinerator bottom ash to partially replace clay for the production of fired clay bricks. Brick samples were heated to temperatures between 800 and 1000 °C for 6 h. Physical, mechanical and leaching tests were conducted on the clay brick samples. The results indicated that the heavy metal concentrations in the leachate met the regulatory thresholds. Increasing the amount of MSWI bottom ash resulted in a de-

crease in the water absorption rate and an increase in the compressive strength of the clay bricks. The addition of MSWI bottom ash also reduced the degree of firing shrinkage. So the MSWI slag was suitable for partial replacement of clay in production of fired clay bricks.

The method for producing clay bricks from MSWI bottom ash or fly ash through firing is very similar to the conventional clay brick production process. Therefore, this method can be easily executed without making major changes in the conventional clay brick production line.

Although much research has been conducted, the commercial production of clay bricks from fly ash and bottom ash is still very limited. The possible reasons are related to the methods for producing clay bricks from fly ash and bottom ash, the potential contamination from the fly ash and bottom ash used, the absence of relevant standards, and the slow acceptance of waste materials-based clay bricks by industry and public.

For wide production and utilization of clay bricks from MSWI bottom ash and fly ash, further research and development is needed, not only on the technical, economic and environmental aspects but also on standardization, government policy and public education. For wide production and utilization of clay bricks from MSWI bottom ash and fly ash, further research and development is needed, not only on the technical, economic and environmental aspects but also on standardization, government policy and public education.

Fly ash and bottom ashes (slag) from municipal solid waste incinerators in Lithuania were considered. The oxide composition of fly and bottom ashes is shown in Table 1.

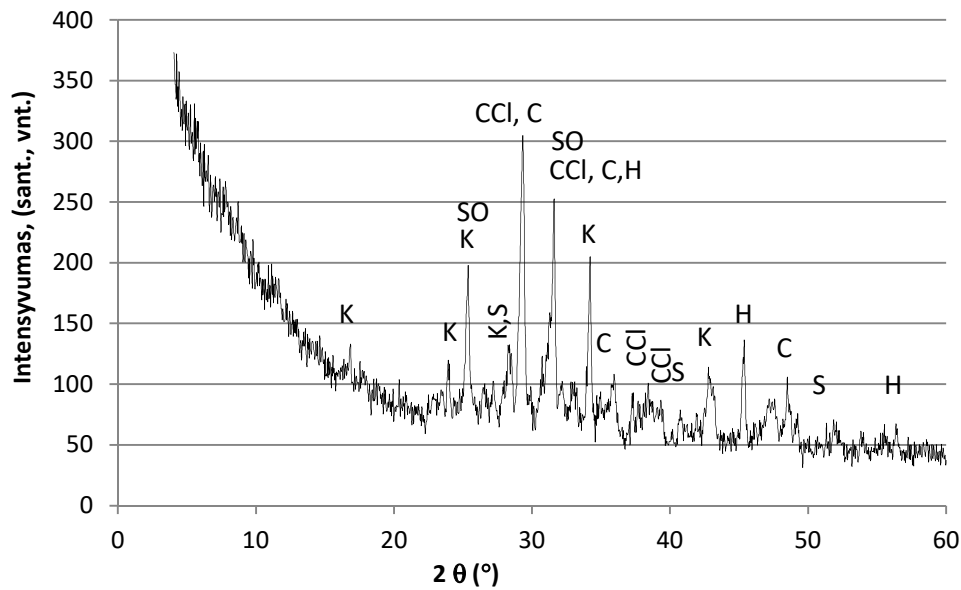
Table 1. – Chemical composition of MSWI bottom and flyashes

MSWI ash	Oxide, (% or mg/kg)									
	CaO	Chloride	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	L.o.i
Bottom ash (slag)	20,8%	0,4%	3,0%	1,3%	2,9%	8,4%	9,7%	2,7%	47,6%	3,2%
Fly ash	47,17%	19,01%	2,65%	3,52%	1,56%	1,08%	6938 mg/kg	1,15%	0,23%	-
	MnO <sub>2</sub>	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Ba	Sr
	334 mg/kg	13,8 mg/kg	1987 mg/kg	83,4 mg/kg	50,5 mg/kg	625 mg/kg	12,2 mg/kg	10209 mg/kg	237 mg/kg	239 mg/kg

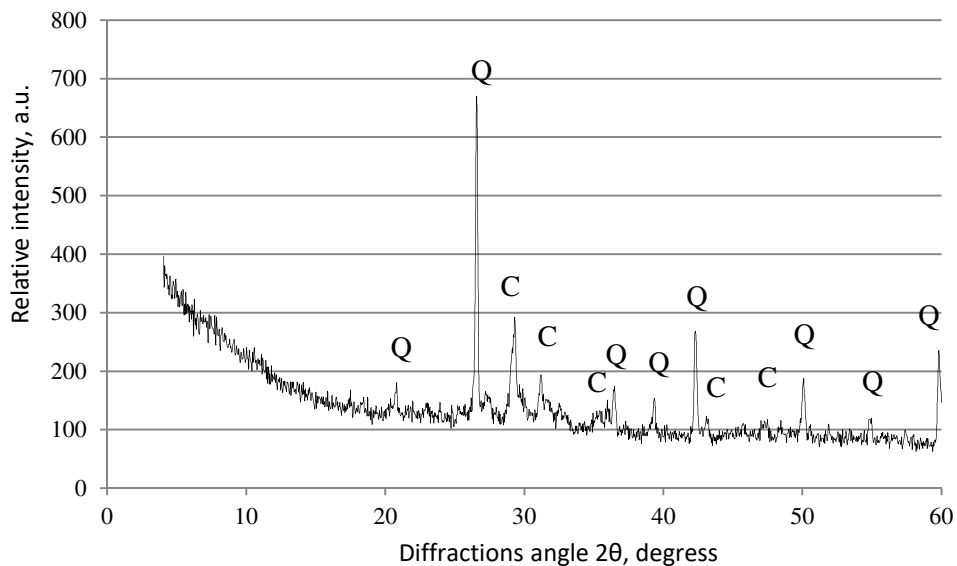
The major chemical components of MSWI bottom ash were SiO<sub>2</sub>, CaO and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A chloride content of about 19% by mass was measured in the fly ash. The major chemical components of MSWI fly ash were CaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O. Table 1 shows the concentration of heavy metals in the fly ash sample. It was determined that pH of fly ash is 11,93, electrical conductivity 15,26 µS/cm; pH of bottom ash is 10,23, electrical conductivity 899,5 µS/cm.

As shown in the XRD pattern in Fig. 1 (a), the crystalline phases in MSWI fly ash were principally halite (NaCl), sylvite (KCl), calcite (CaCO<sub>3</sub>), calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>), anhydrite (CaSO<sub>4</sub>), bottom ash (Fig.1 b) were principally quartz (SiO<sub>2</sub>) and calcite (CaCO<sub>3</sub>).

The SEM images of fly ash and bottom ash are presented in Fig. 2. It can be seen that particles with various shapes and sizes. The pores distribution is quite heterogeneous. The particles are amorphous structure are not well connected (Fig.2 a and c). From the images of b in Fig. 2, it can be seen that there are needle-shaped particles. From the images of d, it can be seen that there are needle-shaped particles. Elongated particles which have dense structure are seen as well (Fig. 2 d).



a



b

Figure 1. – XRD of fly ash (a) and bottom ash (b):  
CCl – calcium chloride, C - calcite, O – potassium calcium chloride, H – sodium chloride,  
S – potassium chloride, SO – anhydrite, Q -quartz

Since MSWI bottom ash and fly ash contain contaminants within them, for production of bricks from bottom ash and fly ash using whatever method, it is important to ensure that the heavy metals within the original waste material are effectively and safely immobilized. Leaching analyses can be conducted following 2003/33/EC [6], USEPA, ASTM and/or other standard methods to check if the leached elements meet the related standard criteria.

According to normative reference [7] (LR AM įsakymas D1-805), slag may be used for civil and building engineering purposes when the metal content in it is not more than 5%, organic content – not more than 3% of its weight, heating loss – not more than 6% and leaching rate – not more than the specific indicated values.

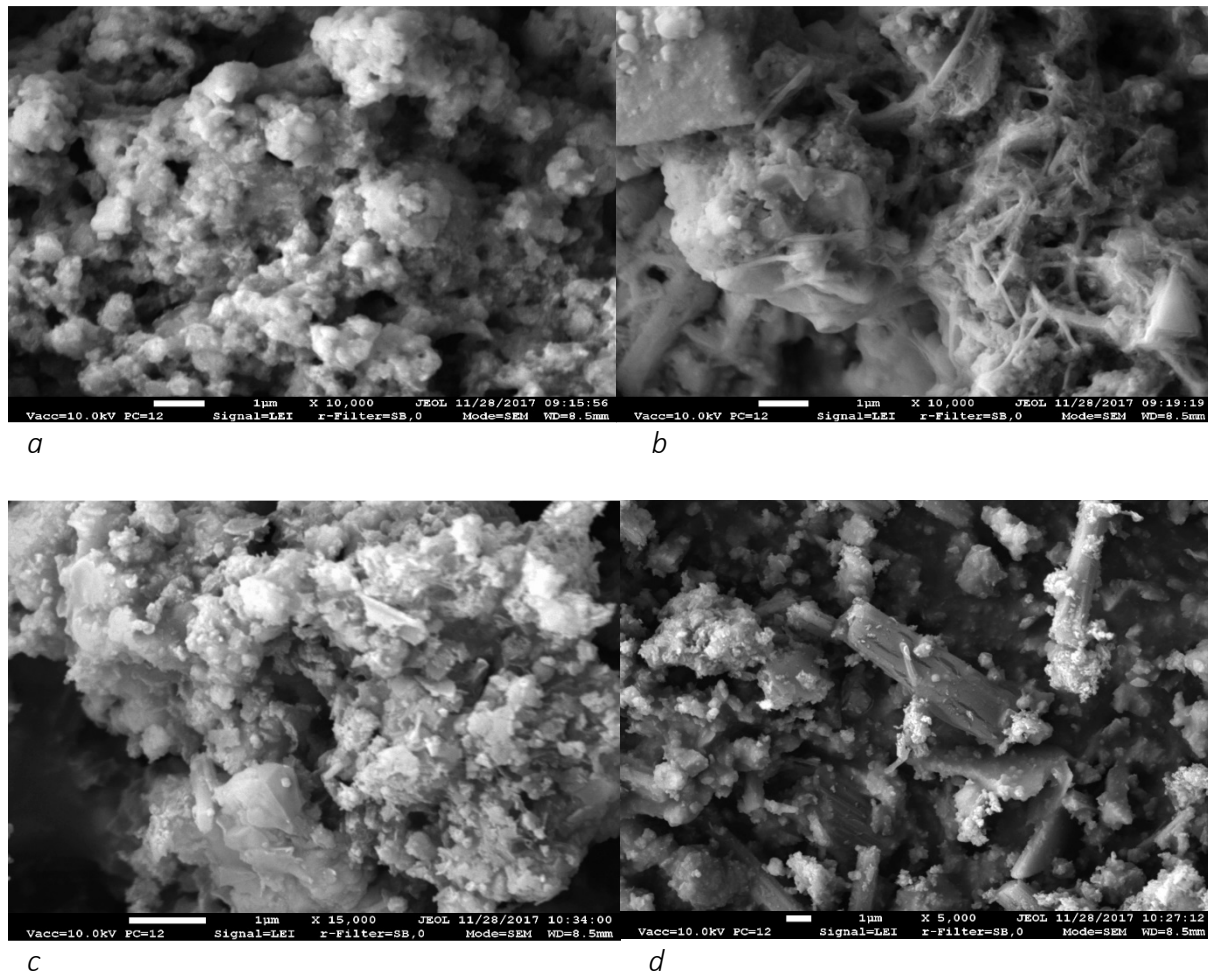


Figure 2. –SEM of fly ash (*a, b*) and bottom ash (*c, d*)

The application of municipal solid waste incineration fly ash in aluminosilicate systems is greatly relevant when it is necessary, at high temperatures, to bind and immobilise heavy metals into insoluble compounds. At high temperatures, Pb and Zn metals are encapsulated in aluminosilicate systems, thus leading to considerably low leaching values [8, 9]. In order to accelerate carbonation processes, before the use, fly ash may be additionally treated with water thus reducing amounts of Pb, Zn, Cu elements [10] and chlorides [11]. It can be as well treated with water and cleaned using electrolytic process [12].

Based on the experience of other countries, authors think that municipal solid waste (slag and fly ash) may be effectively used for the production of aluminosilicate products.

#### REFERENCES

1. Tyrer, M. 12- Municipal solid waste incinerator (MSWI) concrete. *Eco-Efficient Concrete* / M. Tyrer // A volume in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. – 2013. – P. 273–310.
2. Hjelm, O. Disposal strategies for municipal solid waste incineration residues / O. Hjelm // *Journal of Hazardous Materials*. – № 47. – 1996. – P. 345–368.
3. Zhao, Y. Li. Chemical stabilization of MSW incinerator fly ashes // Y. Zhao, L. Song // *Journal of Hazardous Materials*. – 2002. – № 95. – P. 47–63.
4. Haiying, Z. Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in ceramic brick: product characterization and environmental toxicity / Z. Haiying, Z. Youcai, Q. Jingyu // *Waste Management*. – 2011. – № 31. – P. 331–341.

5. Lin, K.L. Feasibility study of using brick made from municipal solid waste incinerator fly ash slag / K.L. Lin // *Journal of Hazardous Materials*. – № 137(3). – 2006. – P. 1810–1816.
6. Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC (2003/33/EC).
7. Lietuvos Respublikos Aplinkos ministras. Įsakymas dėl atliekų deginimo įrenginiuose ir bendro atliekų deginimo įrenginiuose susidariusių pelenų ir šlako tvarkymo reikalavimų patvirtinimo. 2016 m. lapkričio 25 d. Nr. D1-805. Vilnius.
8. Arsenovic, M. 2012. Removal of toxic metals from industrial sludge by fixing in brick structure / M. Arsenovic, Z. Radojevic, S. Stancovic // *Construction and Building Materials*. – 2012. – P. 7–14.
9. Arsenović, M. Mathematic approach to application of industrial wastes in claybrick production // M. Arsenović, Z. Radojević, Ž. Jakšić, L. Pezo. – Part I : Testing and analysis, *Ceramic International*. – 2015. – № 41(3). – P. 4890–4898.
10. 2016. Accelerated co-precipitation of lead, zinc and copper by carbon dioxide bubble in alkaline municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash wash water / L. Wang [and etc.] // *Baloch RSC Advances*. – 2016. – № 6. – P. 20173–20186.
11. Inhibition of heavy metal evaporation by controlling its chemical speciation in MSWI flyash / S. Wu [and etc.] // *Fuel*. – 2015. – № 158 – P. 764–769.
12. Screening of heavy metal containing waste types for use as raw material in Arctic clay-based bricks / L.I. Belmonte [and etc.] // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2016. – P. 1–13.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА: ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА

*Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович, Е.А. Коледа, Н.А. Будревич*

Белорусский национальный технический университет, Минск

email: grushevskay\_en@tut.by, snleonovich@yandex.ru, elena\_koleda@bk.ru,

nellibudrevich@yandex.by

*В самоуплотняющихся бетонных смесях для обеспечения технологических свойств бетонной смеси и физико-механических характеристик бетона, необходимо использовать модифицирующие добавки. Пластифицирующая добавка на основе наноструктурированного углерода, влияя на структуру применяемого вяжущего, позволила создать бетон с исключительными свойствами. Введение пластифицирующей добавки, обеспечивает высокую сохраняемость бетонной смеси, что дает возможность использования ее в монолитном строительстве и при продолжительном транспортировании бетонной смеси. Добавка приводит к снижению водоцементного отношения до 0,2, обеспечивая хорошую удобоукладываемость смеси, что в свою очередь, гарантирует высокую скорость твердения и значительное повышение прочности бетона.*

*Ключевые слова: пластифицирующая добавка, самоуплотняющаяся бетонная смесь, распыл, проходимость, стойкость, вязкость, прочностные характеристики.*

## TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF SELF-COMPLETED CONCRETE: INFLUENCE OF THE ADDITIVE OF NANOSTRUCTURED CARBON

*E. Polonina, S. Leonovich, E. Koleda, N. Budrevich*

Belarusian National Technical University, Minsk

email: grushevskay\_en@tut.by, snleonovich@yandex.ru, elena\_koleda@bk.ru,

nellibudrevich@yandex.by

*In self-compacting concrete mixtures, to ensure the technological properties of the concrete mixture and the physical and mechanical characteristics of concrete, it is necessary to use modifying additives. A plasticizing additive based on nanostructured carbon, influencing the structure of the binder used, made it possible to create a concrete with exceptional properties. The introduction of a plasticizing additive ensures high preservation of the concrete mix, which makes it possible to use it in monolithic construction and during the continuous transportation of a concrete mixture. The additive reduces the water-cement ratio to 0.2, ensuring a good workability of the mixture, which in turn guarantees a high rate of hardening and a significant increase in the strength of the concrete.*

*Keywords: plasticizing additive, self-compacting concrete mix, spreading, patency, durability, viscosity, strength characteristics.*

**Введение.** Одним из актуальных направлений в современном материаловедении является возможность управления структурой материала на стадии его изготовления с использованием наносистем. Структурирование вяжущих матриц углеродными нанотрубками показало высокую эффективность модификации [1]. Кроме того, технология бетона подразумевает обязательное использование эффективных добавок, в том числе, добавок различной природы модифицированных углеродными наноструктурами с целью повышения



их результативности [2]. Одним из факторов, повышающих характеристики цементного бетона, является структурная модификация гидросиликатов кальция относительно композиции и морфологии новообразований [3,4].

В представленной работе в качестве модификаторов структуры использовались: пластифицирующая добавка «АРТ-КОНКРИТ Р на основе наноструктурированного углерода, расширяющая сульфоалюминатная добавка и микрокремнезем конденсированный МКУ-85. Используемая пластифицирующая добавка позволила улучшить технологические свойства бетонной смеси, а также повысить водонепроницаемость, морозостойкость бетона и прочность на сжатие бетона по сравнению с образцом, не содержащую данную добавку.

Методика экспериментальных исследований. В таблице 1 приведены составы тяжелого бетона с применением пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р». Были выбраны две марки по удобоукладываемости – П1 и Р6.

В исследуемых составах также варьировались следующие параметры:

- количество добавки (0,8% и 1,0% от массы цемента);
- расход цемента (485 кг/м<sup>3</sup>; 435 кг/м<sup>3</sup>).

Таблица 1. – Составы опытных образцов 1–6

Номер состава/ Наименование состава		Показатель удобоукладываемости	Расход материалов, кг на 1 м³ бетонной смеси							Вода, кг
			Цемент, кг	Песок, кг	Щебень фр. 5-10 мм, кг	Добавка "АРТ- КОНКРИТ Р"		Расширяющая добавка PCAM, кг	Микрокремнезем МКУ- 85, кг	
						%	кг			
1	Контрольный (бездобавочный, удобоукладываемость Р6)	Р6 (РК более 62 см)	485	800	825	-	-	40	45	320
2	Р 1% (с содержанием добавки в количестве 1% от массы це- мента+PCAM+МК )		485	800	825	1	5,7	40	45	190
3	Р *1%- Ц*10%(с содержанием добавки в количестве 1% от массы цемента +PCAM+МК – 10% цемента )		435	800	825	1	5,7	40	45	190
4	Р 0,8% (с содержанием до- бавки в количестве 0,8% от массы цемента)		485	800	825	0,8	4,56	40	45	205
5	Контрольный 2 (бездобавочный, удобоукладываемость П1)	П1 (ОК=1-4 см)	485	800	825	-	-	40	45	200
6	Р 1% П1 (с содержанием до- бавки в количестве 1% от мас- сы цемента, удобоукладыва- емостью П1)		485	800	825	1	5,7	40	45	130

\*В данной таблице буква «Р» – пластифицирующая добавка “АРТ-КОНКРИТ Р”, «Ц» – цемент.

**Сравнительный анализ.** Для Составов 1–4 кроме подвижности и сохраняемости удобоукладываемости, были исследованы следующие показатели:

- проходимость бетонной смеси с применением Л-образного ящика;

- стойкость бетонной смеси к расслоению методом ситового анализа;
- вязкость бетонной смеси по времени, результаты которых представлены в таблице 2.

Для определения характеристик применялись стандартные методы испытания, изложенные в соответствующих нормативных документах.

Таблица 2. – Результаты испытаний бетонной смеси составов 1–4

Показатели свойств бетонной смеси	Значение показателей			
	Контрольный	R 1 %	R 1% - Ц10%	R 0,8 %
Водоцементное отношение	0,66	0,18	0,43	0,21
Расход цемента, кг/ м <sup>3</sup>	485	485	435	485
Подвижность бетонной смеси, ОК, см	63	64	65	62
Марка по удобоукладываемости	Р6			
Сохраняемость удобоукладываемости, ч	1	2	2	2
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	2220	2255	2005	2330
Вязкость бетонной смеси по времени Т500, с	1,54	2,0	3,31	4,0
Проходимость бетонной смеси испытанием в L – образном коробе	0,64	0,89	0,98	0,2
Стойкость бетонной смеси к расслоению, %	10,4	8,0	7,54	2,0

Исследование влияния пластифицирующей добавки на технологические свойства и характеристики бетонных смесей позволили сделать следующие выводы:

1. Сохраняемость удобоукладываемости зависит от количества вводимой добавки «АРТ-КОНКРИТ Р», причем сохраняемость бетонной смеси в 120 мин обеспечивается при вводе добавки в количестве 0,8-1,0% от массы вяжущих (цемент + РСАМ + МК);

2. Введение добавки, позволяет снизить водоцементное отношение от 0,63 до 0,18, не ухудшая технологические свойства смеси;

3. Проходимость бетонной смеси при испытании в L-образном коробе соответствует требованиям по вязкости VS 2. стойкость бетонной смеси к расслоению – показателю SR1 при представленных количествах добавки «АРТ-КОНКРИТ Р».

С целью всестороннего изучения влияния пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» на свойства тяжелого бетона для Составов 1 – 6 была определена прочность на сжатие в возрасте 7 и 28 суток (табл. 3, рис. 1,2).

Таблица 3. – Результаты испытаний образцов бетона составов 1–6

Номер состава/ Наименование состава		В/Ц	РК (ОК), см	Прочность на сжатие, фс, МПа	
				7 суток	28 суток
1	Контрольный	0,66	63	19,9	33,1
2	R 1%	0,39	64	24,4	37,1
3	R 1%- Ц10%	0,43	65	23,8	35,5
4	R 0,8%	0,42	62	31,1	50,5
5	Контрольный 2	0,41	3	35,6	65,5
6	R 1% П1	0,27	4	52,7	82,4

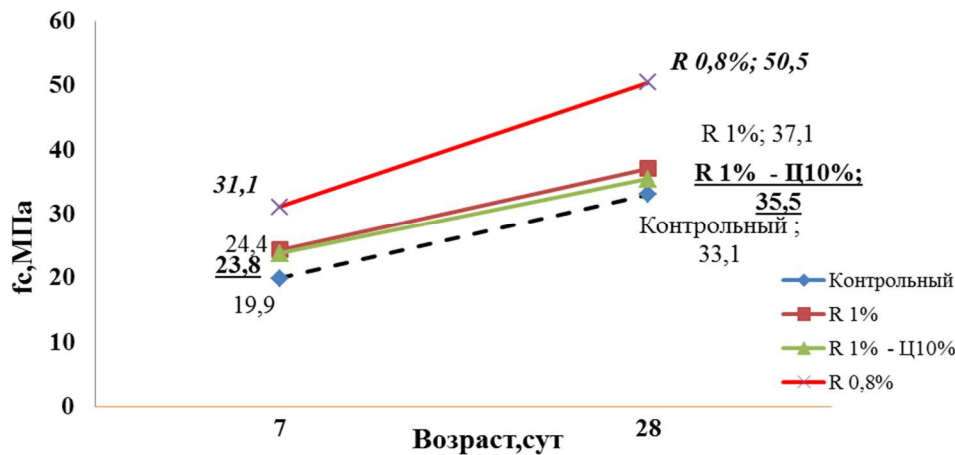


Рисунок 1. – Кинетика набора прочности бетона составов 1–4

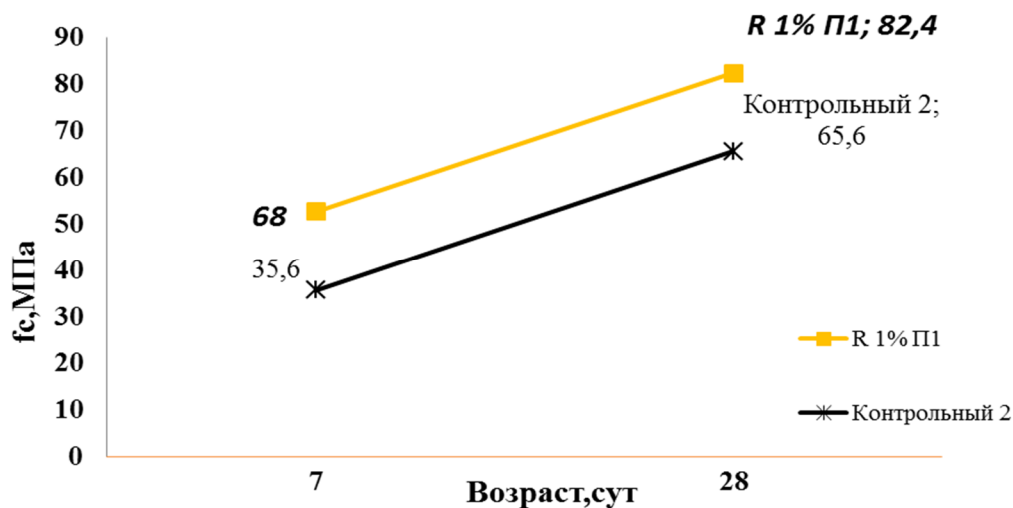


Рисунок 2. – Кинетика набора прочности бетона составов 5–6

Анализ кинетики набора прочности свидетельствует, что образцы Составов 1–6 в возрасте 28 суток соответствуют классу С 20/25. Для подвижных смесей Составы 1–4 (удобоукладываемость Р6) прочность при сжатии ( $f_c$ ) в возрасте 28 суток составила: Д 1%=37,1 МПа; Д 1% Ц10%=35,5 МПа; Д 0,8%=50,5 МПа.

Нужно отметить, что при вводе 0,8% добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» от массы вяжущих прочность бетона возросла на 52% по сравнению с контрольным образцом.

Для жестких смесей Составов 5 и 6 (удобоукладываемость П1) модифицирование пластифицирующей добавкой «АРТ-КОНКРИТ Р» позволило достичь прочности на сжатие в возрасте 28 суток – 82,4 МПа, что соответствует прочности бетона на сжатие класса С 50/60, что выше прочности контрольного образца на 25%.

На основании результатов технологических свойств бетонной смеси для Состава 4 были изготовлены образцы бетона для следующих видов испытаний:

- определения прочности бетона на осевое растяжение в возрасте 28 суток  $f_{ct}$ ;
- определения марки по морозостойкости  $F$ ;
- определения марки по водонепроницаемости  $W$ ;
- определения водопоглощения по массе  $W_m$ .

#### *Определение прочности на осевое растяжение.*

Для определения прочности на осевое растяжение бетонных образцов, модифицированных добавкой «АРТ-КОНКРИТ Р» были изготовлены образцы призмы квадратного сечения размерами 70х70х280мм. По результатам испытаний прочность бетона на осевое значение в серии образцов составила 2,12 МПа.

#### *Определение морозостойкости*

Для определения марки по морозостойкости, был использован ускоренный метод определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании в растворе соли по ГОСТ 10060.2-95. По итогам испытаний можно сделать вывод, что марка по морозостойкости соответствует F 100, причем потеря прочности составляет 3,6% при нормированной потери прочности в 5%.

#### *Определение водонепроницаемости*

Водонепроницаемость бетонных образцов определялась на цилиндрах диаметром 150мм и высотой 150мм. Для определения марки по водонепроницаемости использовался прямой метод при помощи установки для определения водонепроницаемости УВБ-МГ4. После проведения испытания прямым методом, выяснилось, что образцы Состава 4 соответствуют марке по водонепроницаемости W6.

**Заключение.** Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что введение добавки на основе наноструктурированного углерода способствует увеличению прочностных показателей. Прочность самоуплотняющегося бетона с использованием пластифицирующей добавки лежит в пределах 35,5- 50,5 МПа после 28 суток нормального твердения, что превышает прочность бетона без добавки до 52% при удобоукладываемости Р6 и на 25% для смесей с удобоукладываемостью П1. Установлен оптимальный процент ввода добавки для исследуемого состава, который обеспечивает необходимые технологические свойства бетонной смеси и физико-механические характеристики бетона - 0,8%.

Таким образом, получение модифицированной самоуплотняющейся бетонной смеси за счет применения пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода «АРТ-КОНКРИТ Р», способствует повышению однородности структуры, снижению количества дефектов и увеличению прочностных характеристик бетона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дисперсии многослойных углеродных нанотрубок в строительном материаловедении / Б.М. Хрусталева [и др.] // Наука и техника. – 2014. – № 1. – С. 44–52.
2. Смешанный наноглеродный материал в цементных композитах / И.У. Аубакирова [и др.] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2010. – № 10. – С. 16–17.
3. Структурная модификация новообразований в цементной матрице с использованием дисперсии углеродных нанотрубок и нанокремнезема / С.Н. Леонович [и др.] // Наука и техника. – 2017. – Т. 16. – № 2. – С. 94–103.
4. Влияние многослойных углеродных нанотрубок на модуль упругости и микротвердость цементной матрицы / С.Н. Леонович [и др.] // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение : сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф.. – Якутск, 2014. – С. 387–393.
5. Установка для получения углеродных наноматериалов : МПК В82В 3/00 / С.А. Жданок [и др.] ; дата публ.: 30.06.2006.
6. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / С.А. Жданок [и др.] // Вестник БНТУ. – 2009. – № 3. – С. 5–22.
7. Study of the influence of nano-size additives on the mechanical behaviour of cement stone / S. Zhdanok [and etc.] // Наука и техника. – 2009. – № 1. – С. 52–55.
8. Zhdanok, S.A. Method of obtaining of carbon nanomaterial : МПК SO1B31/00 / S.A. Zhdanok, A.P. Solntsev, A.V. Krauklis ; published 31.03.2005.

## БЕТОН С ДОБАВКОЙ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА: ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович, Е.А. Коледа, Н.А. Будревич*

Белорусский национальный технический университет, Минск

email: grushevskay\_en@tut.by, snleonovich@yandex.ru, elena\_koleda@bk.ru,  
nellibudrevich@yandex.by

*Выполненные испытания позволили установить оптимальную концентрацию пластифицирующей добавки, на основе наноструктурированного углерода, в бетонных смесях для обеспечения необходимых технологических свойств бетонной смеси и физико-механических характеристик бетона. Показано, что введение добавки, позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики и долговечность бетона.*

*Ключевые слова: долговечность, наноструктурированный углерод, технологические свойства, удобоукладываемость, сохраняемость, воздухововлечение, прочностные характеристики.*

## CONCRETE WITH NANOSTRUCTURED CARBON ADDITIVES: PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS

*E. Polonina, S. Leonovich, E. Koleda, N. Budrevich*

Belarusian National Technical University, Minsk

email: grushevskay\_en@tut.by, snleonovich@yandex.ru, elena\_koleda@bk.ru,  
nellibudrevich@yandex.by

*The tests made it possible to determine the optimal concentration of the plasticizing additive, based on nanostructured carbon, in concrete mixes to ensure the necessary technological properties of the concrete mixture and the physical and mechanical characteristics of the concrete. It is shown that the introduction of an additive allows to substantially increase the operational characteristics and durability of concrete.*

*Keywords: durability, nanostructured carbon, technological properties, workability, maintainability, air entrainment, strength characteristics.*

**Введение.** Разработка новых методов улучшения физико-технических показателей бетона является одним из направлений эффективных исследований в области строительного материаловедения. Применение различных видов наноразмерных добавок, которые широко используются в различных областях промышленности, включая многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), приводит к улучшению указанных свойств.

В то же время не решена задача с равномерным распределением МУНТ в объеме бетона, а также существуют противоречивые точки зрения на механизм их влияния на показатели свойств бетона. Все это в значительной степени ограничивает обширное использование МУНТ при производстве бетона [1,2].

Решению данной задачи способствует разработка комплексных полифункциональных добавок, включающих суперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов и МУНТ, которые обеспечат модифицирование цементных бетонов для создания высококачественного композиционного материала с высокими эксплуатационными и технологическими свойствами.

Во многих исследованиях обоснована возможность модифицирования тяжелых бетонов на основе портландцемента водными дисперсиями МУНТ, приводящая к повышению физико-технических свойств бетона. В то же время в строительном материаловедении известны многочисленные работы, связанные с изучением влияния суперпластификаторов на свойства бетонных смесей и бетонов, их структурообразование и процессы гидратации портландцемента. Однако недостаточно исследований, посвященных изучению структурированию цементной матрицы бетона в комплексном присутствии суперпластификатора и многослойных углеродных нанотрубок.

Целью данной работы является изучение влияния вводимой в состав бетона пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода на технологические свойства и характеристики бетонных смесей: подвижность, сохраняемость удобоукладываемости, а также физико-механические свойства тяжелого бетона.

**Методика экспериментальных исследований.** Оценку эффективности действия добавки на основе наноструктурированного углерода проводили при получении бетона, состав которого, представлен в таблице 4.

Таблица 4. – Расход материалов, кг на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси

Наименование материала	Цемент	Щебень фр.5-20мм	Песок	Вода
Расход, кг	400	1020	820	200

С целью установления влияния добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» на технологические свойства бетонных смесей, были подобраны оптимальные дозировки данной добавки, которые представлены в таблицах 5 и 6. Образцы Составов 1.1-1.4 должны соответствовать классу бетона по прочности на сжатие С20/25, марки по водонепроницаемости W6, марке по морозостойкости F 100; удобоукладываемости бетонной смеси (по осадке конуса) П4-П5 и сохраняемости бетонной смеси 90 мин. Образцы Составов 1.5 и 1.6 имеют отличие в удобоукладываемости бетонной смеси, данные смеси являются жесткими. В исследованных составах варьировались следующие параметры:

- удобоукладываемость (П1, П4-П5);
- количество добавки (0,6% и 0,8% от массы цемента);
- расход цемента (400 кг/м<sup>3</sup>; 360 кг/м<sup>3</sup>).

Таблица 5. – Опытные образцы составов 1.1–1.4 (подвижная смесь)

Наименование объекта испытаний, показатели, технические требования	№ состава	Показатель удобоукладываемости	Наименование состава
В25 (С20/25) W6 F100	1.1	П4-П5 (ОК=16-20; 21-25 см)	Контрольный (бездобавочный, удобоукладываемость П4-П5)
	1.2		R 0,8% (с содержанием добавки в количестве 0,8% от массы цемента )
	1.3		R *0,8%- Ц*10%(с содержанием добавки в количестве 0,8% от массы цемента – 10% цемента )
	1.4		R 0,6% (с содержанием добавки в количестве 0,6% от массы цемента)

Таблица 6. – Опытные образцы составов 1.5-1.6 (жесткая смесь)

B25 (C20/25) W6 F100	1.5	П1 (ОК=1-4 см)	Контрольный 2 (бездобавочный, удобоукладываемость П1)
	1.6		R 0,8% П1 (с содержанием добавки в количестве 0,8% от массы цемента, удобоукладываемостью П1)

\*В данной таблице буква «R» – пластифицирующая добавка «АРТ-КОНКРИТ Р», «Ц» – цемент.

**Сравнительный анализ.** Для Составов 1.1-1.4. были исследованы технологические характеристики, такие как подвижность и сохраняемость удобоукладываемости, результаты которых представлены в таблице 7. Для определения характеристик применялись стандартные методы испытания, изложенные в соответствующих нормативных документах.

Таблица 7. – Результаты испытаний бетонной смеси составов 1.1-1.4

Показатели свойств бетонной смеси	Значение показателей			
	Контрольный	R 0,8 %	R 0,8% – Ц10%	R 0,6%
Водоцементное отношение	0,5	0,3	0,29	0,45
Расход вяжущего, кг/ м <sup>3</sup>	400	400	360	400
Подвижность бетонной смеси, ОК, см	22	23	23	20
Марка по удобоукладываемости	П4-П5	П4-П5	П4-П5	П4-П5
Сохраняемость удобоукладываемости, ч	0,5	3	2	1,5
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	2367	2250	2215	2256

Исследование влияния пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» на технологические свойства и характеристики бетонных смесей позволили сделать следующие выводы:

1. Сохраняемость удобоукладываемости зависит от количества вводимой добавки «АРТ-КОНКРИТ Р», минимальное количество которой составляет 0,6%, при котором обеспечивается требуемая сохраняемость бетонной смеси в 90 мин;
2. Введение пластифицирующей добавки «АРТ-КОНКРИТ Р», позволяет снизить водоцементное отношение (до В/Ц=0,3), не ухудшая технологические свойства смеси.

С целью всестороннего изучения влияния пластифицирующей добавки на свойства тяжелого бетона B25 (C20/25) W6 F100 для Составов 1.1-1.6 была определена прочность на сжатие в возрасте 7 и 28 суток (табл. 8, рис. 1, 2).

Анализ кинетики набора прочности свидетельствует, что образцы всех Составов 1.1–1.6 в возрасте 28 суток соответствуют классу B25 (C20/25).

Для подвижных смесей рис. 3 (удобоукладываемость П4-П5) модифицирование пластифицирующей добавкой «АРТ-КОНКРИТ Р» позволило увеличить прочность при сжатии ( $f_c$ ) в возрасте 28 суток по сравнению с бездобавочным составом соответственно: для Состава 1.2 – на 5%(51,9 МПа); для Состава 1.3 – на 3% (51,1 МПа); для Состава 1.4 – на 17%(57,8 МПа), при этом произошло ускорение набора прочности к 7 суткам хранения на 34-58% по сравнению с контрольным составом.

Зафиксировано оптимальное количество добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» – 0,6% от массы цемента.



Таблица 8. – Результаты испытаний образцов бетона составов 1.1–1.6

Наименование состава / номер состава		Расход материалов, кг на 1 м3 бетонной смеси					Вода, кг	В/Ц	ОК, см	Прочность на сжатие, fс, МПа	
		Цемент, кг	Пе- сок, кг	Ще- бень, кг	Добавка «АРТ- КОНКРИТ Р»					7 суток	28 суток
					%	кг					
В25 (С20/25) W6 F100	1.1	400	820	1020	-	-	200	0,50	22	25,2	49,2
	1.2	400	820	1020	0,8	3,2	120	0,30	23	35,7	51,9
	1.3	360	820	1020	0,8	3,2	105	0,29	23	33,9	51,1
	1.4	400	820	1020	0,6	2,4	180	0,45	20	39,9	57,8
	1.5	400	820	1020	-	-	155	0,39	2	46,8	59,5
	1.6	400	820	1020	0,8	3,2	110	0,28	3	57,7	64,7

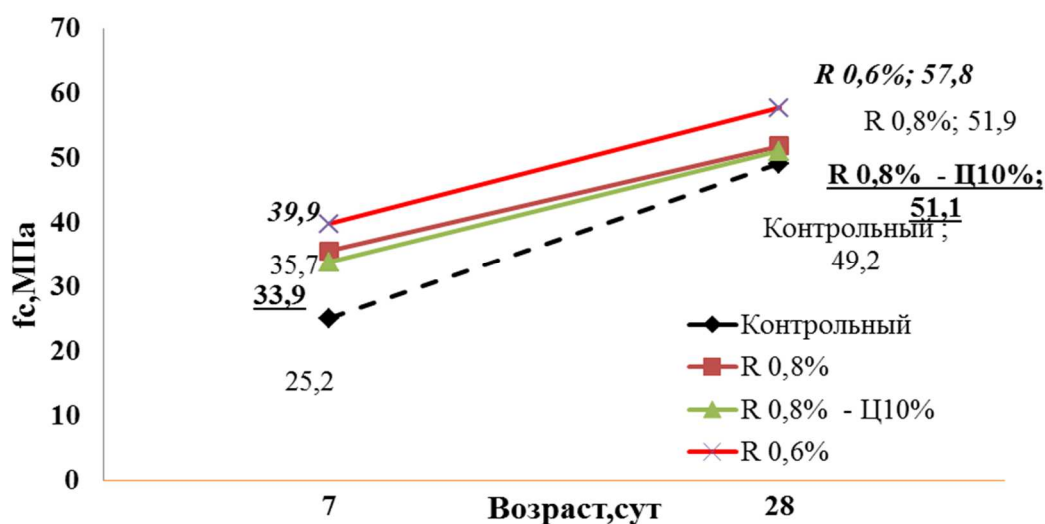


Рисунок 1. – Кинетика набора прочности бетона составов 1.1–1.4

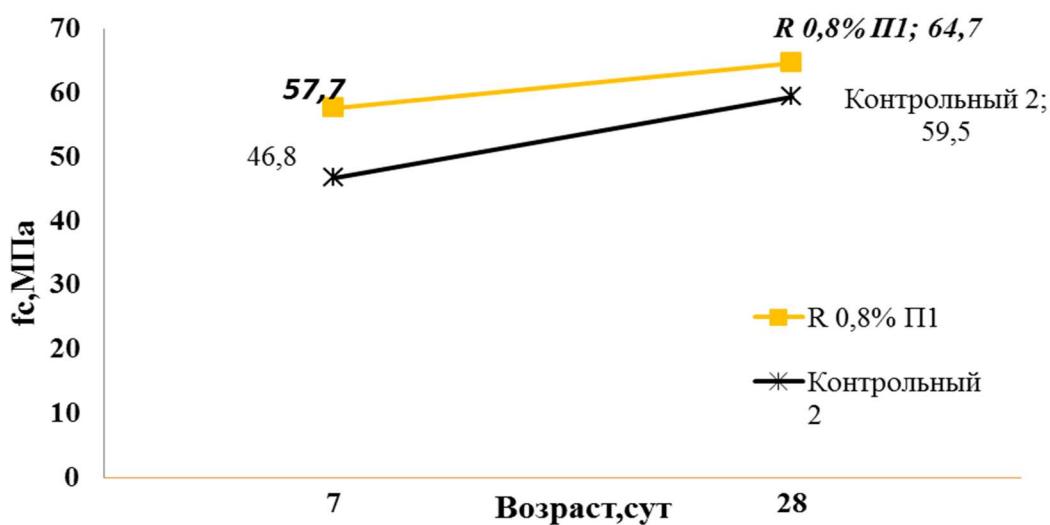


Рисунок 2. – Кинетика набора прочности бетона составов 1.5–1.6

Для жестких смесей рис. 4 (удобоукладываемость П1) модифицирование позволило достичь прочности на сжатие в возрасте: 7 суток равное 57,7 МПа; 28 суток - 64,7 МПа; что выше прочности контрольного образца на 23% и 8% соответственно.

На основании результатов технологических свойств бетонной смеси для Состава 1.2 были изготовлены образцы бетона для следующих видов испытаний:

- определения прочности бетона на осевое растяжение в возрасте 28 суток  $f_{ct}$ ;
- определения марки по морозостойкости  $F$ ;
- определения марки по водонепроницаемости  $W$ ;
- определения водопоглощения по массе  $W_m$ .

Определение прочности на осевое растяжение. Для определения прочности на осевое растяжение бетонных образцов, модифицированных добавкой «АРТ-КОНКРИТ Р» были изготовлены образцы призмы квадратного сечения размерами 70x70x280 мм. По результатам испытаний прочность бетона на осевое значение в серии образцов составила 2,85 МПа, что превышает требуемую прочность при подборе состава более 25%.

Определение морозостойкости. Для определения соответствия бетона Состава 1.2 предъявляемой марки по морозостойкости, был использован ускоренный метод определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании в растворе соли по ГОСТ 10060.2-95. По итогам испытаний можно сделать вывод, что марка по морозостойкости соответствует предъявляемым требованиям, причем потеря прочности составляет 0,7% при нормированной потере прочности в 5%. Данные сведения говорят о более высокой марке по морозостойкости, чем  $F 100$ .

Определение водонепроницаемости. Водонепроницаемость бетонных образцов определялась на цилиндрах диаметром 150 мм и высотой 150 мм. Для определения марки по водонепроницаемости использовался косвенный метод при помощи устройства для ускоренного определения водонепроницаемости АГАМА -2 РМ по ГОСТ 12730.5-84 (таблица 9).

Таблица 9. – Определение водонепроницаемости косвенным методом

Наименование объекта испытаний	Нормированные значения показателей, установленных в ТНПА	Фактическое значение показателей для каждого образца, сек.				Вывод о соответствии требованиям ТНПА
		1 2	3 4	5 6	Ср. (3 и 4)	
Состав 1.2	W6 (6,6 -9,4 с/см <sup>3</sup> )	17,0 60,4	64,3 127,4	130,2 130,2	95,8	Соотв. W6

После проведения испытания косвенным методом, выяснилось, что образцы Состава 1.2 соответствуют марке по водонепроницаемости W20, что значительно превышает требуемый параметр W6.

Определение водопоглощения. Водопоглощение бетона отдельного образца по массе составил:  $W_m=2,1\%$ .

**Заключение.** Установлен оптимальный процент ввода добавки «АРТ-КОНКРИТ Р» для исследуемого состава, который обеспечивает необходимые технологические свойства бетонной смеси и физико - механические характеристики бетона - 0,8%.

Для бетона, модифицированного пластифицирующей добавкой:

— подвижных смесей (удобоукладываемость П4-П5) модифицирование позволило увеличить прочность при сжатии в возрасте 28 суток по сравнению с бездобавочным составом на 17% (57,8 МПа).

— жестких смесей (удобоукладываемость П1) - прочность на сжатие составила в возрасте: 7 суток  $f_c=57,7$  МПа, 28 суток - 64,7 МПа, что выше прочности контрольного образца на 23% и 8% соответственно;

Прочность на осевое растяжение составила  $f_{ct}=2,85$  МПа, марка по водонепроницаемости соответствует W20, марка по морозостойкости более F100 с потерей прочности в 0,7%.

Обосновано улучшение технологических свойств за счет применения пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода, которые формируют кристаллогидратные новообразования, что способствует повышению степени гидратации цемента, тем самым способствуя уплотнению структуры цементной матрицы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дисперсии многослойных углеродных нанотрубок в строительном материаловедении / Б.М. Хрусталева [и др.] // Наука и техника. – 2014. – № 1. – С. 44–52.
2. Влияние многослойных углеродных нанотрубок на модуль упругости и микротвердость цементной матрицы / Г.И. Яковлев [и др.] // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение : сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф.. – Якутск, 2014. – С. 387–393.
3. Установка для получения углеродных наноматериалов : МПК В82В 3/00 // С.А. Жданок, А.В. Крауклис, П.П. Самцов, В.М. Волжанкин ; дата публ. 30.06.2006.
4. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / С.А. Жданок [и др.] // Вестник БНТУ. – 2009. – № 3. – С. 5–22.
5. Study of the influence of nano-size additives on the mechanical behaviour of cement stone / S. Zhdanok [and etc] // Наука и техника. – 2009. – № 1. – С. 52–55.
6. Method of obtaining of carbon nanomaterial : МПК SO1B31/00 / S.A. Zhdanok, A.P. Solntsev, A.V. Krauklis ; published 31.03.2005.
7. Characterization of the influence of carbon nanomaterials on the mechanical behavior of cement stone / J. Eberhardsteiner [and etc] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2011. – Vol. 84. – N. 4. – P. 697–704.

## ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНО-ЗОЛЬНОГО КАМНЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ

Л.М. Парфёнова, М.Н. Высоцкая

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: l.parfenova@psu.by, m.vysotskaya@psu.by

*Рассматривается влияние водовяжущего отношения и условий твердения на прочность цементно-зольного камня с использованием отвальной золошлаковой смеси Белорусской ГРЭС г.п. Ореховск. Приведены результаты определения прочности на сжатие цементно-зольного камня в возрасте 7 и 28 суток при нормально-влажностных условиях твердения и после тепловлажностной обработки. Установлена оптимальная дозировка золы.*

*Ключевые слова: портландцемент, отвальная золошлаковая смесь, зола, комплексное вяжущее, химический состав, замещение цемента, цементно-зольный камень, условия твердения, суперпластификатор.*

## STRENGTH OF CEMENT-ASH STONE DEPENDING ON CONDITIONS OF CURING

L. Parfenova, M. Vysotskaya

Polotsk State University, Belarus

email: l.parfenova@psu.by, m.vysotskaya@psu.by

*The influence of the water-binding ratio and the hardening conditions on the strength of the cement-ash stone with the use of the ash and slag mixture of the Belorusskaya state district power station of the urban settlement Orekhovsk. The results of the determination of the compressive strength of cement-ash stone at the age of 7 and 28 days under normal-humidity conditions of curing and after heat-moisture treatment are given. The optimum dosage of ash is established.*

*Keywords: Portland cement, ash and slag mixture, ash, complex astringent, chemical composition, cement substitution, cement-ash stone, hardening conditions, superplasticizer.*

В настоящее время в Республике Беларусь увеличивается использование биомассы в качестве топлива на тепловых электростанциях. Планы развития энергетики направлены на создание устойчивой энергетической системы, ориентированной на использование возобновляемых источников энергии, в значительной степени на биотопливо, а именно торф и древесную щепу. Опыт Швеции, Австрии, Дании показывает [1] негативное воздействие на окружающую среду и людей золошлаковых отвалов, образующихся на тепловых электростанциях от сжигания древесины, соломы, побочных продуктов целлюлозной промышленности, отходов деревообработки и лесозаготовки.

Следует отметить высокий уровень утилизации золошлаковых отходов в европейских странах – около 50%, во Франции и в Германии – 70%, в Финляндии – около 90% их текущего выхода [2]. Наибольшее практическое применение золошлаковые отходы

находят в технологии бетонов. Частичная замена части цемента золой решает задачи экономии клинкерного фонда, получения прочных и долговечных железобетонных конструкций и утилизации многотонажных золошлаковых отходов [3].

Для определения возможности эффективного использования золошлаковой торфодревесной смеси Белорусской ГРЭС для замещения части цемента проведен комплекс исследований по изучению влияния водовяжущего отношения, условий и сроков твердения, доли золы в составе комплексного вяжущего на свойства цементно-золяного камня, такие как плотность и прочность при сжатии.

В качестве основного компонента для испытаний был использован портландцемент ЦЕМ I 42,5Н и фракция золошлаковой смеси, прошедшая через сито № 008, т.е. зольная часть (далее зола) со следующими характеристиками: насыпная плотность 960 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность 2300 кг/м<sup>3</sup>. Портландцемент заменялся золой в диапазоне 10%, 20% и 30% от вяжущего по массе. Для проведения испытаний изготавливались образцы-кубики ребром 2 см. Прочность на сжатие цементно-золяного камня определялась в возрасте 7 и 28 суток при нормально-влажностных условиях твердения и в возрасте 1 суток после тепловлажностной обработки.

В качестве пластифицирующей добавки использовался суперпластификатор поликарбоксилатного типа Стахемент 2000МЖ30 в количестве 0,6% от массы вяжущего.

Результаты определения прочности цементно-золяного камня после тепловлажностной обработки представлены на рисунке 1.

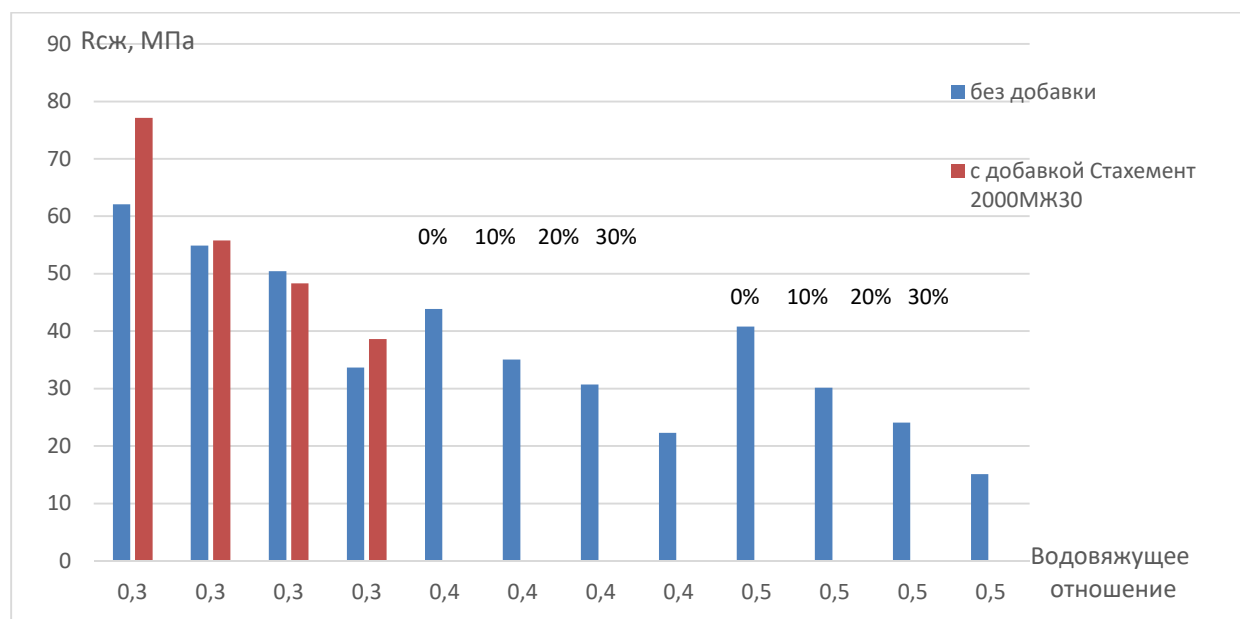


Рисунок 1. – Влияние водовязущего отношения и доли золы в вяжущем на прочность цементно-золяного камня после тепловлажностной обработки

Экспериментально установлено, что увеличение процента замещения цемента золой при постоянном водовязущем отношении снижает прочность цементно-золяного камня. При водовязущем отношении 0,4 прочность при доле золы 10%, 20%, 30% соответственно снизилась на 20%, 30%, 49% по сравнению с контрольным образцом без золы. Водовязущее отношение также влияет на прочность образцов. При 10% золы в соста-

ве комплексного вяжущего прочность цементно-зольного камня уменьшилась на 11%, 20%, 26% соответственно при водовяжущем отношении 0,3; 0,4 и 0,5. Введение суперпластификатора в цементно-зольное тесто улучшило удобоукладываемость, но при этом не оказало значительного влияния на прочность образцов.

Изменение прочности на сжатие цементно-зольного камня при разной дозировке золы и водовяжущем отношении в возрасте 7 и 28 суток при твердении в нормально-влажностных условиях представлено на рисунке 2. Полученные результаты показали, что при увеличении процента замещения портландцемента золой прочность на сжатие цементно-зольного камня снижается.

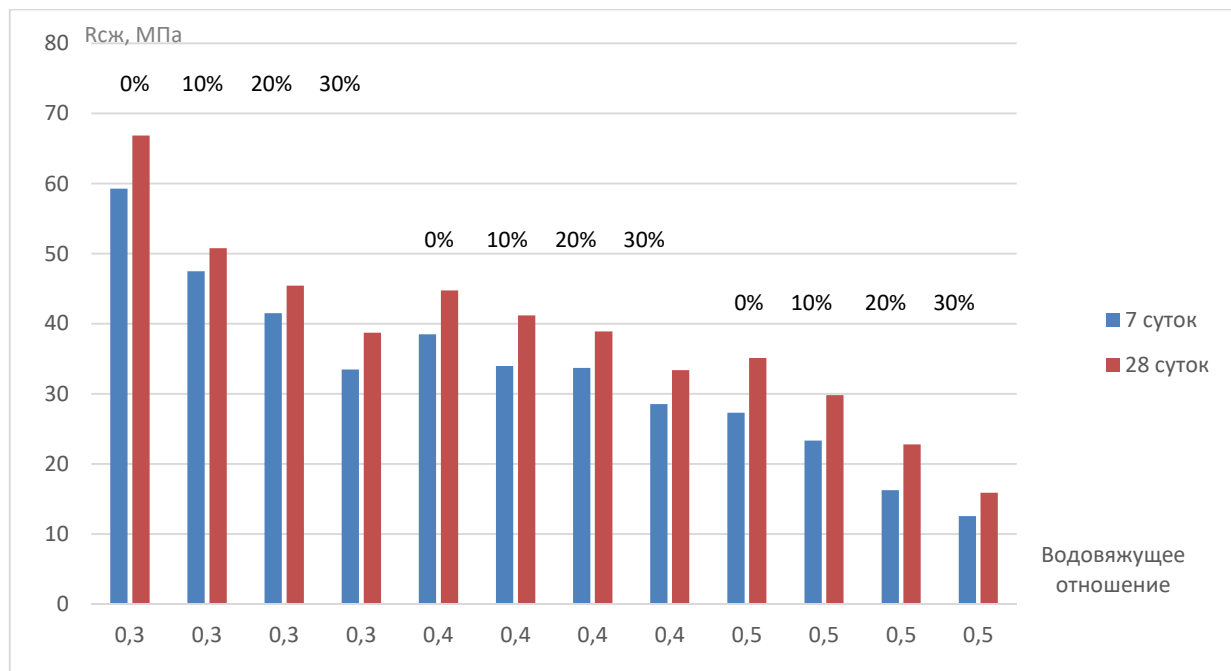


Рисунок 2. – Влияние водовяжущего отношения и доли золы в вяжущем на прочность цементно-зольного камня при твердении в нормально-влажностных условиях

Установлено, что при водовяжущем отношении 0,3 прочность цементно-зольного камня при доле золы 10%, 20%, 30% соответственно снизилась на 24%, 31%, 42% по сравнению с контрольным образцом без золы. При 20% золы в составе комплексного вяжущего прочность цементно-зольного камня уменьшилась на 31%, 13%, 35% соответственно при водовяжущем отношении 0,3; 0,4 и 0,5.

В работе [4] в качестве критерия оценки гидравлической активности применяемой добавки в составе комплексного вяжущего предложено использовать коэффициент эффективности, представляющий собой обратную величину процентного снижения прочности по отношению к контрольному бездобавочному составу на 1% вводимой добавки.

Коэффициент эффективности добавки определялся по формуле

$$K_{\text{эф}} = \frac{\% \text{ содержания добавки}}{(R_k - R_d) \times 100 / R_k}$$

где  $R_k$  – прочность контрольного состава, МПа;

$R_d$  – прочность состава с добавкой, МПа.

Результаты расчетов коэффициента эффективности приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Коэффициент эффективности добавки в составе комплексного вяжущего

Номер состава	Соотношение компонентов, %	Водовязущее отношение	Коэффициент эффективности Кэф при условиях твердения	
	цемент:зола		ТВО	НВУ
1	100:0	0,5	контр	контр
2	90:10	0,5	0,382	0,417
3	80:20	0,5	0,488	0,625
4	70:30	0,5	0,476	0,713
5	100:0	0,4	контр	контр
6	90:10	0,4	0,498	1,252
7	80:20	0,4	0,665	1,531
8	70:30	0,4	0,609	1,178
9	100:0	0,3	контр	контр
10	90:10	0,3	0,861	0,660
11	80:20	0,3	1,067	0,541
12	70:30	0,3	0,655	0,549

Установлено, что применение торфодревесной золы Белорусской ГРЭС в составе комплексного вяжущего на основе портландцемента приводит к снижению прочности цементно-золяного камня по сравнению с составами без золы в возрасте 7 и 28 суток при нормально-влажностных условиях твердения и после тепловлажностной обработки.

Проведенные испытания показали, что наиболее эффективной является добавка золы в количестве 20% при водовязущем отношении 0,3 при тепловлажностной обработке (Кэф=1,067), а также добавка в количестве 10%, 20%, 30% при водовязущем отношении 0,4 при твердении в нормально-влажностных условиях (Кэф=1,178÷1,531).

Улучшение механических свойств цементно-золяного камня может быть достигнуто в более поздние сроки твердения, так как процесс гидратации замедляется. В работе [5] показано, что при замене части цемента в составе комплексного вяжущего золой до 30% прочность на сжатие цементно-золяного камня почти равна прочности контрольного образца без золы после 56 дней твердения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вильдбахер, Н. Утилизация золы котельных, работающих на древесном топливе/ Н. Вильдбахер. – Минск : BIOS ПРООН/ГЭФ/Правительство Респ. Беларусь, 2007. – 28 с.
2. Парфенова, Л.М. Обзор зарубежных технологий утилизации золошлаковых отходов теплоэлектростанций / Л.М. Парфенова, М.Н. Высоцкая // Геодезия, картография, кадастр, ГИС-проблемы и перспективы развития : материалы междунар. науч.- практ. конф., Новополоцк, 9–10 окт. 2016 г. : в 2 ч. / Полоц. гос. ун-т., 2016. – Ч. 2. – С. 138–143
3. Samrit, S. Use of Fly Ashes Partial Replacement of Cement in Concrete Pavements / S. Samrit, P. Shrikhande, M.V. Mohod // International Conference on Science and Technology for Sustainable Development. – 2016. – P. 60–65
4. Кучеров, Д.Е. Композиционные вяжущие с минеральными добавками различного генезиса и бетоны на их основе : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Д.Е. Кучеров. – Белгород, 2011.
5. Chakraborty, J. Replacement of Cement by Fly Ash in Concrete / J. Chakraborty, S. Banerjee // SSRG International J. of Civil Engineering. – 2016. – Vol. 3, № 8. – P. 58–60.

## ФЛЮСОВЫЙ ИЗВЕСТНЯК СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В КАЧЕСТВЕ КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Н.Л. Полейко, С.Н. Леонович, А.И. Пелюшкевич

Белорусский национальный технический университет, Минск

email: pdn13@land.ru; snleonovich@yandex.ru; anrei.pelsh@mail.ru

*Область экономического использования различных видов заполнителей все время расширяется из-за постоянно меняющихся требований к бетонам по их эксплуатационным качествам, области применения, физико-техническим свойствам, условиям долговечности и т.д. Многочисленными исследованиями установлено, что наиболее рациональное применение различных видов заполнителей в бетоне оказывает большое влияние на технические характеристики бетона строительных конструкций. Приведены результаты исследований бетона на щебне из флюсового известняка, который является вторичным продуктом металлургической промышленности. На основании проведенных исследований показано, что флюсовый известняк может применяться для изделий и конструкций из тяжелого бетона наряду с такими заполнителями, как гранитный щебень и природный гравий.*

*Ключевые слова: щебень гранитный, флюсовый известняк, щебень из гравия, бетон.*

## FLUX LIMESTONE OF STEEL-FUELING PRODUCTION AS A LARGE FILLER

N. Poleyko, S. Leonovich, A. Pelyushkevich

Belarussian National Technical University, Minsk

email: pdn13@land.ru; snleonovich@yandex.ru; anrei.pelsh@mail.ru

*The field of economic application of various types of fillers is expanding all the time due to permanently changing requirements for concretes concerning their operating qualities, application fields, physical-technical properties, durability conditions etc. Numerous studies have established that the most rational use of various types of fillers in the concrete greatly influences on the technical characteristics of the concrete of building structures. Results of the studies of the concrete prepared with crushed fluxing limestone, which is a secondary product of metallurgical industry, are presented. On the basis of the study conducted, it is shown that the fluxing limestone can be used for products and structures of heavy-weight concrete along with such fillers as granite macadam and natural gravel.*

*Keywords: granite macadam, fluxing limestone, crushed gravel, concrete*

Разносторонние требования к эксплуатационным качествам, области применения и физико-техническим свойствам бетонов, требованиям долговечности, а также к работе предприятий строительной индустрии в рыночных условиях расширяют область экономического использования различных видов заполнителей [1–8].

Если учесть, что заполнители занимают в бетоне до 80 % объема и их стоимость достигает 50 % стоимости бетонных и железобетонных конструкций, становится понятным, почему изучение, правильный выбор заполнителей и их рациональное применение влияют на свойства бетонной смеси, бетонных и железобетонных конструкций, а также на технико-



экономическую эффективность производства строительных изделий из сборного и монолитного бетона и железобетона в целом [9–14].

В настоящее время в Беларуси в качестве крупного заполнителя для приготовления тяжелого бетона используют гранитный щебень, щебень из гравия и гравий. Гранитный щебень относится к глубинным изверженным горным породам, гравий и щебень из гравия – к осадочным.

В данной статье рассматриваются результаты испытаний тяжелых бетонов на крупном заполнителе из осадочной горной породы – известняке. Флюсовый известняковый щебень – вторичный продукт в металлургической промышленности, в частности на РУП «Белорусский металлургический завод». В технологии металлургического производства для выплавки стали применяют флюсовый известняк (известняковый щебень) фракции 5 мм и ниже. Вторичный продукт – щебень, который характеризуется содержанием зерен от 5 до 40 мм, причем количество крупных фракций существенно превосходит количество мелких. Флюсовый известняк выпускают в соответствии с требованиями ТУУ 14-16-53-2000 «Щебень из флюсового известняка». Химический состав и процентное содержание основных соединений представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав и процентное содержание основных соединений

Показатель	Содержание, масс. %
Массовая доля CaO + MgO	52,5–54,0
Массовая доля MgO	5,0
Массовая доля SiO <sub>2</sub>	1,5–2,0
Массовая доля S	0,06–0,09
Массовая доля P	0,06–0,09
Массовая доля нерастворимого остатка в соляной кислоте	2,0–4,0

Как свидетельствуют данные, приведенные в таблице 1, флюсовый известняк представляет собой материал осадочного происхождения, состоящий преимущественно из оксидов кальция и магния. Согласно требованиям СТБ 1544–2005 «Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия», в качестве заполнителей для приготовления тяжелых бетонов могут применяться материалы из осадочных горных пород. Предварительно проведенные испытания по определению физико-механических характеристик осадочной горной породы показали, что щебень из флюсового известняка состоит преимущественно из фракции 20–40 мм. По содержанию лещадных зерен, пылевидных частиц и марке по дробимости щебень из флюсового известняка удовлетворяет требованиям согласно ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород. Технические условия». Физико-механические характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Физико-механические характеристики щебня из флюсового известняка

Содержание зерен, % крупностью, мм					Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Плотность в уплотненном состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Плотность зерен, кг/м <sup>3</sup>
Свыше 40	40–20	20–10	10–5	Менее 5			
8,79	82,47	8,06	0,36	0,31	1278	1430	2610
Содержание зерен лещадной и игловатой форм – 16,3 мас. %.							
Содержание пылевидных частиц – 1,9 мас. %.							
Марка щебня по дробимости – 1000.							

Для применения данного щебня в качестве крупного заполнителя требуется его обогащение мелкими фракциями, так как при данном зерновом составе он не соответствует требованиям СТБ 1544–2005 «Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия» и обладает повышенной пустотностью, что приводит к перерасходу цемента в бетонной смеси. Для обогащения известнякового щебня и получения смешанного заполнителя использовали обычный гранитный щебень и природный гравий.

С целью определения рациональной области применения известнякового щебня проводились исследования по изучению влияния данного заполнителя на прочностные и эксплуатационные свойства тяжелых бетонов. Были подобраны составы бетонов различных классов по прочности при сжатии. Результаты, полученные при испытании бетона на известняковом щебне, сравнивались с аналогичным бетоном, изготовленным на гранитном щебне. Для получения сопоставимых данных искусственно подбирали фракционный состав гранитного щебня до появления кривой просеивания, аналогичной смешанному заполнителю.

Содержание отдельных фракций в смешанном крупном заполнителе, гранитном щебне и гравии представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Содержание отдельных фракций в смешанном крупном заполнителе, гранитном щебне и гравии

Наименование заполнителя	Содержание фракций (известняка, гранита и гравия) в крупном заполнителе, %								
	Щебень из флюсового известняка			Гранитный щебень			Гравий		
	5–10	10–20	20–40	5–10	10–20	20–40	5–10	10–20	20–40
Смешанный	–	–	50	20	30	–	–	–	–
Гранитный	–	–	–	20	30	50	–	–	–
Гравий	–	–	–	–	–	–	20	30	50

Расход цемента в бетонной смеси варьировался от 250 до 450 кг на 1 м<sup>3</sup>, водоцементное отношение – от 0,4 до 0,6. Составы бетона приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Составы бетона

№ состава	Расход составляющих, кг на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси					В/Ц
	Цемент	Песок	Смешанный заполнитель	Гранитный щебень	Гравий	
1	250	785	1200	–	–	0,6
2	350	745	1150	–	–	0,5
3	450	745	1100	–	–	0,4
4	250	780	–	1200	–	0,6
5	350	745	–	1150	–	0,5
6	450	740	–	1100	–	0,4
7	350	750	–	–	1150	0,5

При подборе состава бетона использовали песок с  $M_k = 2,51$  и портландцемент ПЦ-500 Д20 ОАО «Красносельскстройматериалы».

Для исследований в лабораторных условиях изготавливались опытные образцы, которые твердели в нормально-влажностных условиях и подвергались испытанию в возрасте 28 сут.

Прочность бетонов при сжатии и растяжение при раскалывании определяли на образцах-кубах с ребром 15 см. Результаты испытаний по определению прочности при сжатии и растяжении при раскалывании представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Результаты испытаний по определению прочности при сжатии и растяжении при раскалывании

№ состава	Предел прочности*, МПа, в возрасте 28 сут.	
	при сжатии	растяжение при раскалывании
1	23,7/26,2	1,5/1,9
2	33,0/36,4	2,4/2,8
3	44,3/51,1	2,7/3,1
4	22,7/25,8	1,4/2
5	33,4/37,1	2,5/2,7
6	46,7/49,5	2,8/3
7	28,2/31,5	1,7/2,2
Примечание. * Значения минимального и максимального пределов прочности, полученных при испытаниях.		

Экспериментальные данные (табл. 5) показывают, что бетон на смешанном заполнителе по прочностным показателям не отличается от обычного бетона, изготовленного на гранитном щебне. Смешанный заполнитель, состоящий из зерен, имеющих более развитую поверхность, превосходит по прочностным показателям бетон, изготовленный с использованием гравия, зерна которого имеют окатанную поверхность.

Немаловажное значение имеет исследование заполнителя на соответствие эксплуатационным характеристикам бетонов, к которым относятся показатели, косвенно характеризующие долговечность материала, а именно: способность бетона противостоять воздействию знакопеременной температуры (морозостойкость), способность бетона противостоять проникновению различных агрессивных веществ (водонепроницаемость), а также защищать стальную арматуру в течение длительного срока эксплуатации (защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре) [15].

Для оценки морозостойкости и водонепроницаемости бетона, изготовленного с использованием заполнителя из флюсового известняка, готовились основные образцы на смешанном заполнителе и контрольные – на гранитном щебне. Образцы формовали из составов бетона с расходом цемента 250, 350 и 450 кг на 1 м<sup>3</sup> при В/Ц = 0,6; 0,5 и 0,4. Морозостойкость и водонепроницаемость определяли по методике согласно ГОСТ 10060.1–95 «Бетоны. Базовый метод определения морозостойкости» и ГОСТ 12730.5–84 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости». Результаты испытаний представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Морозостойкость и водонепроницаемость образцов, изготовленных на смешанном заполнителе и гранитном щебне

Вид заполнителя	Расход цемента	В/Ц	Водопоглощение, мас. %	W, МПа	F, циклы
Смешанный	250	0,6	7,2	0,2	75
Гранитный	250	0,6	7,7	0,2	75
Смешанный	350	0,5	5,8	0,4	100
Гранитный	350	0,5	6,3	0,4	100
Смешанный	450	0,4	4,2	0,6	150
Гранитный	450	0,4	4,6	0,6	150

Данные таблицы 6 свидетельствуют о том, что известняковый щебень не влияет на такие свойства бетона, как морозостойкость и водонепроницаемость. Незначительное различие в показателе водопоглощения образцов на смешанном и гранитном щебне может быть

вызвано снижением капиллярной пористости цементного камня при использовании смешанного заполнителя. Капиллярная пористость цементного камня в бетоне определяется истинным водоцементным отношением, которое зависит от способности заполнителя поглощать часть воды при затворении бетонной смеси. По опытным данным, количество воды, поглощаемое зернами известнякового щебня при прочих равных условиях, на 40 % выше, чем количество воды, поглощаемое зернами гранитного щебня.

Таким образом, при использовании в качестве крупного заполнителя щебня из флюсового известняка при прочих равных условиях создается возможность для снижения капиллярной пористости цементного камня. Однако, как свидетельствуют результаты испытаний, это не оказывает ощутимого влияния на повышение морозостойкости и водонепроницаемости бетона.

Поскольку, как было показано выше, в материале щебня из флюсового известняка в незначительном количестве присутствуют соединения серы и фосфора, вполне естественным является изучение влияния данного заполнителя на защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Оценка защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре проводили по методике согласно СТБ 1168–99 «Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стали в бетоне и защитных свойств». Состав бетона на смешанном заполнителе для проведения исследований принимался согласно СТБ 1168–99. Для сравнения были выбраны образцы бетона, изготовленного с использованием гранитного щебня. В качестве рабочего электрода использовали арматуру класса S240. Результаты испытаний представлены в таблице 7.

Таблица 7. – Результаты потенциостатических исследований

Показатель	Требования нормативного документа	Фактическое значение
Установившийся потенциал, мВ	–	–310/–324*
Плотность тока при потенциале +300 мВ, мкА/см <sup>2</sup>	До 10,0	1,21/1,56*
Потенциал разрушения пассивной пленки, мВ	–	+550/+630*
Примечание. * Значение показателей для образцов на смешанном заполнителе.		

Согласно данным таблицы 7 и требованиям, приведенным в СТБ 1168–99, сталь в образцах на смешанном заполнителе (щебень из флюсового известняка + гранитный щебень) находится в пассивном состоянии. Следовательно, на начальном этапе (до воздействия эксплуатационной среды) бетон на щебне из флюсового известняка обладает достаточными защитными свойствами по отношению к стальной арматуре.

В рамках выполненных исследований были разработаны и прошли опытную апробацию составы бетонных смесей с использованием щебня из флюсового известняка, подобраны бетонные смеси и разработаны рекомендации по применению флюсового известняка при производстве железобетонных изделий.

#### Выводы:

1. Применение известнякового щебня в качестве крупного заполнителя возможно путем его обогащения, т.е. приведения его зернового состава в соответствие с требованиями нормативной документации.
2. Щебень из флюсового известняка не влияет на прочностные показатели бетонов, а также не оказывает отрицательного влияния на морозостойкость и водонепроницаемость бетона.

3. Бетон на заполнителе из флюсового известняка обладает достаточными защитными свойствами по отношению к стальной арматуре (сталь находится в пассивном состоянии).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вайсберг, Л.А. Оценка технологических возможностей управления качеством щебня при дезинтеграции строительных горных пород / Л.А. Вайсберг, Е.Е. Каменева, В.Н. Аминов // Строительные материалы. – 2013. – № 11. – С. 30–34.
2. Дворкин, Л.И. Строительные материалы из отходов промышленности / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Ростов н/Д : Феникс, 2007. – 368 с.
3. Вайсберг, Л.А. Исследование структуры порового пространства гнейсогранита методом рентгеновской компьютерной микротомографии / Л.А. Вайсберг, Е.Е. Каменева // Обогащение руд. – 2013. – № 3. – С. 37–41.
4. Олейник, П.П. Организация системы переработки строительных отходов / П.П. Олейник, С.П. Олейник. – М. : МГСУ, 2009. – 251 с.
5. Ильичев, В.А. О развитии производства строительных материалов на основе вторичных продуктов промышленности / В.А. Ильичев, Н.И. Карпенко, В.Н. Ярмаковский // Строительные материалы. – 2011. – № 4. – С. 36–42.
6. Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве / В.С. Горшков [и др.] ; под ред. В.С. Горшкова. – М. : Стройиздат, 1985. – 272 с.
7. Оценка энергетического состояния сырья для получения строительных материалов / Л.А. Вешнякова [и др.] // Строительные материалы. – 2012. – № 10. – С. 55–56.
8. Полейко, Н.Л. Физико-механические показатели бетона на кубовидном щебне / Н.Л. Полейко, С.Н. Леонович // Строительные материалы. – 2015. – № 7. – С. 13–16.
9. Пучин, К.Г. Вопросы экологии использования твердых отходов черной металлургии в строительных материалах / К.Г. Пучин // Строительные материалы. – 2012. – № 8. – С. 54–56.
10. Юшков, Б.С. Металлургические шлаки в производстве железобетонных свай, эксплуатирующихся в неагрессивной среде / Б.С. Юшков, С.С. Семенов // Строительные материалы. – 2012. – № 12. – С. 14–15.
11. Петров, В.П. Пористые заполнители из отходов промышленности / В.П. Петров, С.А. Токарева // Строительные материалы. – 2011. – № 11. – С. 46–50.
12. Старчуков, Д.С. Бетоны ускоренного твердения с добавками твердых веществ неорганической природы / Д.С. Старчуков // Бетон и железобетон. – 2011. – № 4. – С. 22–24.
13. Загер, И.Ю. Сравнительная оценка продуктов дробления горных пород месторождений нерудных строительных материалов Ямало-Ненецкого автономного округа / И.Ю. Загер, А.А. Ашинкина, Л.Н. Андропова // Строительные материалы. – 2011. – № 5. – С. 84–86.
14. Добшиц, Л.М. Определение морозостойкости крупного заполнителя для тяжелых бетонов / Л.М. Добшиц, И.И. Магомедэминов // Бетон и железобетон. – 2012. – № 4. – С. 16–19.
15. Корнеева, Е.В. Исследования шлаков сталеплавильного производства с целью вторичного использования / Е.В. Корнеева // Строительные материалы. – 2012. – № 8. – С. 62–63.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Д.А. Семёнов, В.И. Клевеко

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия  
email: s7dmit@yandex.ru

*Выявлены слабые места геосинтетических оболочек: швы и отверстия для заполнения. Рассмотрены основные технологии производства геооболочек и их вариации, позволяющие снизить или компенсировать влияние слабых мест оболочки и, тем самым, увеличить ее прочность. Исследованы различные методы устройства швов и соединения геотекстильных листов. В зависимости от необходимых параметров для конкретных сфер применения подобраны наиболее рациональные способы изготовления геосинтетических оболочек.*

*Ключевые слова: геосинтетическая оболочка, шов, фланец, ткацкий станок, диаметр, прочность.*

## TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF GEOSYNTHETIC SHELLS USED IN CONSTRUCTION

D. Semenov, V. Kleveko

Perm National Research Polytechnic University, Russia  
email: s7dmit@yandex.ru

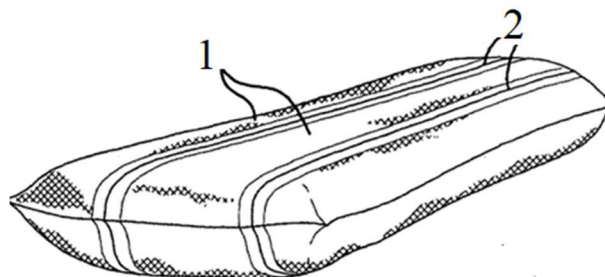
*Weak points of geosynthetic shells are revealed: seams and holes for filling. The main technologies of production of geo-shells and their variations are considered, allowing to reduce or compensate for the influence of weak places of the shell and, thereby, to increase its strength. Various methods of jointing and joining geotextile sheets have been investigated. Depending on the required parameters for specific applications, the most rational methods for manufacturing geosynthetic shells.*

*Keywords: geosynthetic shell, seam, flange, loom, diameter, strength.*

При устройстве автомобильных дорог, фундаментов зданий, строительстве подпорных стен и решении других строительных задач привычным стало использование геосинтетических материалов. В этих вопросах большой потенциал у геосинтетических оболочек, область применения которых долгое время ограничивалась гидротехническим строительством. Предложения о использовании геосинтетических оболочек в других видах строительства в нашей стране озвучивались давно, но лишь недавно начали воплощаться в жизнь. Возможности и области применения геосинтетических оболочек зависят от их материала, размеров, прочности, водонепроницаемости и других характеристик, закладываемых на этапе проектирования и производства. В связи с этим, актуальной становится проблема рационального производства геосинтетических оболочек для решения конкретных задач.

Существует два основных метода производства геосинтетических оболочек, имеющих свои преимущества и недостатки: сшивание нескольких геосинтетических листов и формирование непрерывной оболочки путем намотки, и множество их вариаций [1].

Основная проблема, связанная с геосинтетическими оболочками, заключается в разрыве геотекстиля, что приводит к утечке содержащегося в оболочке материала. Разрывы в оболочке могут возникнуть в результате взаимодействия с острыми предметами, неправильного устройства швов, которые соединяют геотекстильные листы, или приложения силы на швы. Швы геосинтетической оболочки являются самой слабой частью конструкции. Показанное на рисунке 1 устройство геооболочек путем сшивания геотекстильных листов приводит к формированию продольных, спиральных или окружных швов вдоль всей длины оболочки.



**Рисунок 1. – Изготовление геосинтетических оболочек путем сшивания геотекстильных листов:**  
**1 – геотекстильные листы; 2 – швы**

Соединение листов осуществляется с помощью швейных машин. Помимо этого, соединение может быть выполнено с помощью ультразвуковой или высокочастотной сварки. Прочность шва зависит от его исполнения и разновидности, а также материала оболочки. Оболочка может также содержать опорные ремни, выполненные в виде неотъемлемой части оболочки во время ее изготовления, или добавленные на последующей стадии. Опорные ремни используются для крепления оболочки во время установки и использования.

Еще одно слабое место в геосинтетической оболочке это отверстие для заполнения, образованное путем вырезания кругового отверстия в верхней части геооболочки и шитья маленькой цилиндрической трубки из листа геотекстиля. Полученный шов обычно плохо сформирован из-за его круглой формы. Кроме того, круглое отверстие, вырезанное в верхней части оболочки, не имеет фабричной кромки по его окружности. Таким образом, эта область подвергается растрескиванию и может вытягиваться, когда находится под нагрузкой.

Геотекстильный лист может иметь первую часть и вторую часть, которые имеют разные узоры плетения. Второй узор плетения может быть прочнее, чем первый. Размещение швов в усиленных участках листов влияет на более сильное соединение и увеличивает прочность шва. Кроме того, геосинтетическая оболочка может быть выполнена таким образом, что один или оба конца не имеют поперечных швов. В этом отношении поперечный шов может быть расположен на дне оболочки и отдален от ее концов. Устранение поперечных швов на концах может помочь укрепить геосинтетическую оболочку и предотвратить разрыв в этих местах[2].

По второму методу геосинтетическая оболочка наматывается из гибкого листа геотекстильного материала, имеющего равномерную ширину, причем лист наматывается спирально в трубчатую форму, так что смежные стороны соседних спиральных витков перекрывают друг друга, внутренние поверхности спиральных витков поддерживаются вспомогательными средствами, представляющими собой по меньшей мере две удаленные друг от друга опорные поверхности. Схематично данный метод производства геосинтетических оболочек отражен на рисунке 2.

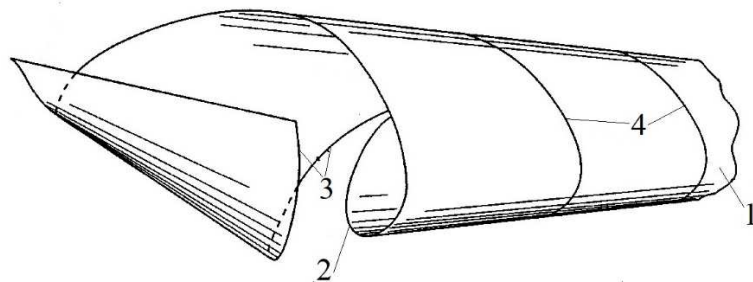


Рисунок 2. – Формирование геосинтетической оболочки методом намотки:  
1 – геотекстильный лист; 2 – первый боковой край; 3 – второй боковой край; 4 – фланец

Степень перекрытия или наложения сторон спиральных витков будет зависеть от конкретных требований к оболочке и может варьироваться от нескольких миллиметров до почти общей ширины ткани. Степень перекрытия должна соответствовать нагрузке, которую оболочка должна выдерживать при использовании, и это определит соответствующий угол спирали для заданной ширины листа и окружности оболочки.

Метод позволяет создавать оболочки с широким диапазоном характеристик путем изменения ширины листа, окружности оболочки, степени перекрытия сторон спиральных витков или угла спирали. Сшивание перекрытых сторон спиральных витков может включать в себя шитье, по меньшей мере, одного из множества швов, параллельных друг другу по бокам.

Сшивание перекрытых сторон спиральных витков может быть выполнено посредством образования петель между швейными нитями, так называемый цепной стежок. Шитье может быть выполнено также с помощью переплетения швейной нити, например, строчки. Оболочка формируется путем складывания одного или обоих концов в радиальном направлении внутрь или наружу, а затем скрепления, сшивания или сварки[3].

Для создания геосинтетической оболочки большого диаметра может использоваться один широкий лист, охватывающий всю окружность оболочки, однако для создания такого листа потребуются крупногабаритный и, соответственно, дорогой ткацкий станок.

В качестве альтернативы, несколько листов меньшей ширины могут быть сшиты вместе вдоль их длин, чтобы сформировать одну оболочку большого диаметра. Еще один вариант – формирование оболочки большого диаметра из нескольких оболочек меньшего диаметра. Однако каждый из этих вариантов приводит к увеличению количества нежелательных продольных швов.

Решить проблему продольных швов можно путем применения круглого ткацкого станка, позволяющего производить непрерывную ткань трубчатой формы, но этот метод также имеет ограничения, такие как: небольшой диаметр получаемой оболочки, высокая стоимость круглых ткацких станков, ограниченный выбор нитей. Круглые ткацкие станки не могут плести некоторые типы синтетических нитей, оптимальных для формирования более прочных тканей, позволяющих создавать геосинтетические оболочки большого диаметра и прочности. Это связано с неспособностью круглого ткацкого станка ткать ткань, состоящую из толстых или жестких нитей.

Увеличить прочность швов возможно следующим способом: каждый шов, как продольный, так и торцевой, который соединяет соседние листы геотекстильного материала, частично образуется клапанами, расположенными вдоль соответствующих краев соседних листов. Линия сшивания прошивается через противоположные клапаны для образования сшитого фланца, который образует часть этого шва. Фланец может быть выполнен в виде



стыковочного шва (также известного как «молитвенный» шов), шва «J», или шва бабочки. Считается, что заполняющий материал выравнивает фланец с внутренней поверхностью оболочки и тем самым направляет направленные наружу усилия на сторону фланца. Таким образом, давление наполнителя оболочек прижимает противоположные грани тканевого шва вместе, а не заклинивает их отдельно[4].

Геосинтетическую оболочку можно изготовить с по меньшей мере двумя слоями геотекстильного материала. Внутренний слой геотекстильного материала содержит первый шов, который направлен по спирали в одну сторону. Внешний слой геотекстильного материала окружает внутренний слой и имеет второй спиральный шов, направленный в другом направлении, не соответствующем фазе первого спирального шва внутреннего слоя. Каждый спиральный шов выдерживает напряжения в своей области оболочки, так что такая комбинация усиливает оболочку[5].

Параметры геосинтетических оболочек зависят от конкретных целей их применения: в гидротехническом строительстве должен быть обеспечен значительный объем (для обезвоживания различных суспензий, берегоукрепления и т.д.), высокая скорость фильтрации, прочность и возможность повторного применения. Следовательно, оптимальной будет оболочка большого диаметра, выполненная из геотекстильных листов с разным узором плетения, что увеличит скорость фильтрации. В подземном и городском строительстве предъявляются высокие требования к прочности и устойчивости оболочки, но, чтобы выбрать оптимальную технологию производства, необходимо определить подходящие размеры оболочки, что на данный момент является малоизученным вопросом и будет рассмотрено в дальнейших публикациях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дубинин, С.В., Михайлова Т.В. Применение мягких оболочечных конструкций для очистки сточных вод с точки зрения геоэкологической безопасности / С.В. Дубинин // Вестник КузГТУ. – 2017. – №6 – С. 149 – 153.
2. Geotextile tube : пат. US 0129866A1 / J.L. Smallwood, W.A. Smallwood ; дата публ. 21.05.2009.
3. Method and apparatus for making a continuous tube of flexible sheet material : пат. US 5232429A / J. Cizek, N.J.J. van Rensburg ; publ. 03.08.1993.
4. Geotextile container and method of producing same : пат. US 6056438A / A.S. Bradley ; publ. 02.05.2000.
5. Apparatus and method for deploying geotextile tubes : пат. US 7357598B1 / A.S. Bradley ; publ. 15.04.2008.

## ASSESSMENT OF ROAD TRAFFIC NOISE POLLUTION: A CASE STUDY

Fareed M.A. Karim, Khaled Abdulhalim Rubassi  
 Faculty of Engineering, University of Aden, Yemen  
 Al Nahdi A.S  
 Polotsk state University, Belarus  
 email: far\_krm@yahoo.com

*The present study provides an evaluation of road traffic noise pollution in the city of Taiz. Statistical noise index  $L_{10}$  (18 hour) was calculated at 55 streets throughout the city of Taiz. The British Calculation of Road Traffic Noise (CRTN) method was used to calculate the noise level throughout the city for the year 2015. Corrections for mean traffic speed, gradients, percent of heavy vehicles, road surface types are determined using appropriate expressions. The results showed that Taiz is environmentally noise polluted at all the studied locations, except at two locations, with noise levels ranging between 60.1 and 73.7 dB(A); thereby exceeding the maximum allowable limit of 60 dB(A). Actual noise measurement carried out using sound level meter at 10 locations and it has been found that the difference between measured and calculated noise using CRTN method was within the limit  $\pm 3.0$  dB(A).*

*The CRTN method was also employed to predict future noise levels throughout the city for the year 2025 which were found to be higher than the current predicted noise levels.*

*Keywords: Traffic Noise Pollution, Noise Assessment, CRTN, Taiz city.*

Noise is unwanted sound. The increasing urbanization in cities and the growth of activities therein have contributed to the mounting volume of noise, intruding upon the quiet life and privacy of the urban dwellers. The annoyance and discomfort caused by noise can at times assume serious proportions meriting urgent attention. Noise in cities is the result of a number of activities such as road traffic, aircraft, railways and industrial and constructional works. The traffic engineer is concerned with the abatement source of annoyance [1].

Generation of noise by road traffic

The generation of noise caused by road traffic can be considered under the following categories [2].

- 1- Noise generated by various parts of the vehicle;
  - Engine (Power Unit), especially during acceleration;
  - Aerodynamic friction;
  - Exhaust system;
  - Sounds of cooling fans, gearboxes and brakes;
  - Horns;
- 2- Noise contributed by the interaction between the vehicle and the road surface.
- 3- Noise dependent on the speed, flow and density of traffic.

Noise sources associated with transportation include passenger vehicles, medium trucks, heavy trucks and buses. Each of these vehicles produces noise, however, the source and the magnitude of the noise can vary greatly depending on the vehicle type, while the noise from passenger vehicles occurs mainly from the tire-roadway interface and is therefore located at ground level, it was found that noise from heavy trucks is produced by a combination of noise from the tires, the engine, and the exhaust, resulting in a noise source that is approximately 2 m, above the ground [3]. Table (1) shows the maximum limit or the acceptable limits allowed according to the Yemeni legislation noise control regulation for environment protection [4].

Table 1. – Yemeni Ambient Noise Standards

LAND USE	Limits – Leq Decibel (A)		
	Day 7:00-18:00	Evening 18:00-23:00	Night 23:00-07:00
Rural Residences and Picnic Places	45	40	35
Residential Areas in sub-urbs	50	45	40
Urban Residential Areas	55	50	45
Urban Residential Areas with Workshops and City Centers	60	55	50
Industrial and Commercial Areas	70	70	60

Developed countries in the world have put some norms on the noise levels. For example in Sweden, the guidelines for indoor noise levels are 45 dB and for outdoor are 65 dB [5]. If these limit values is exceeded, then noise can be deemed to be a potential sanitary nuisance.

**Study Area Profile.** Large cities like Taiz face growing problems with noise pollution, which is a significant environmental problem in many developing areas. Fig. (1) shows the number of vehicles registered in Taiz city during 1996- 2008, from this figure, it can be seen that the high percentage of vehicles, the continuously increasing rate of growth in vehicle ownership due to fast development, the expansion of the economy and fast growth of the industrial and commercial sectors all contribute to noise pollution. In addition to the relatively large population growth of approximately 2.65 million in year 2008, the city has been expanding continuously in all directions during the past two decades. This high percentage of vehicles, along with the continuously increasing rate of growth in vehicle ownership, contributed to the high noise level recorded in this city. Predictions and measurements of road traffic noise levels are essential for roadway planning and noise control [6].

The number of registered vehicles in the city has increased from 9508 in 1996 to 67989 in 2008 recording an average annual growth rate of 16.3% during 1996-2008[7].

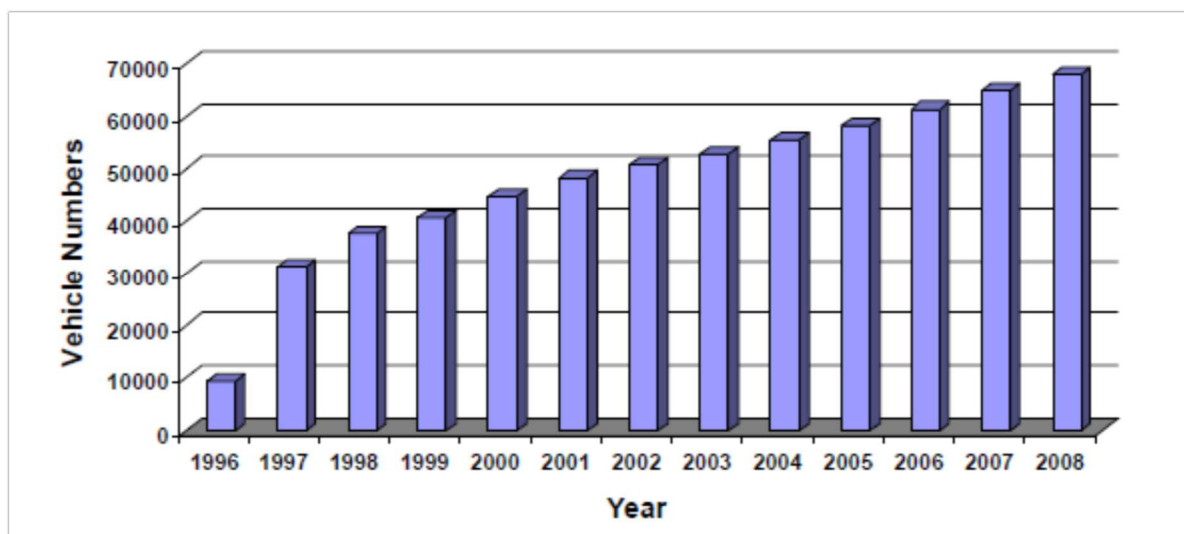


Figure 1. – Growth of Vehicles in Taiz

**Earlier studies.** Data on noise pollution in Yemen is scarce and not enough studies are available to present the effects of traffic noise pollution. However, noise measurement carried

out in year 2006 in the capital city of Sana'a as a part of Comprehensive Traffic Management study for Sana'a (Environment and Social Assessment)[8]. In this study 16 major intersection in the city were selected for the noise pollution study. The study showed that the equivalent noise level dB (A) at these sites varies from 72 to 77 dB(A) there by exceeding the permissible values given by the Yemeni Environmental Protection Agency, as shown in figure (2) below.

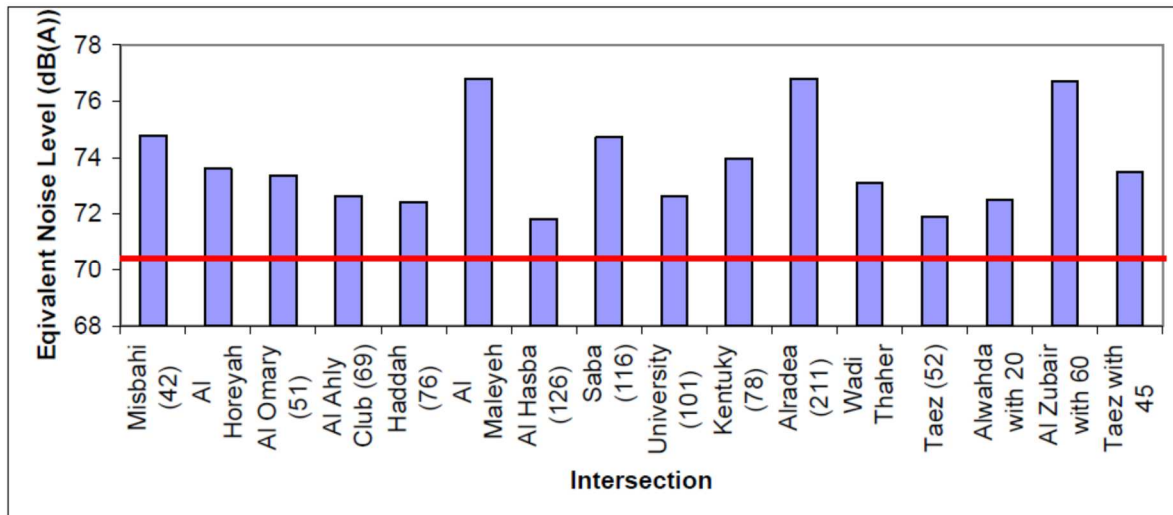


Figure 2. – Noise measurements at sixteen different crossings in Sana'a city

## 2. Materials and Methods

The adopted data collection procedure is designed in such a way to collect as much data in an accurate and practical manner. The noise measurement are taking place simultaneously along with the traffic count. The criteria for selection the measurement location is:

1. Class of the road (i.e. arterial, collector, or local);
2. Traffic volume and composition;
3. Land use within the road vicinity.

Specially designed forms were prepared to record and document all the collected data. The temperature and wind speed were recorded during the measurements, while the humidity data obtained from the Civil Aviation and Metrology Authority.

The noise is measured using a sound level meter. During the measurement, the sound level meter is located at a distance of about 10.0 m from the existing road level about 1.5 m above the road surface. For each measurement, two replicates were taken.

Traffic volumes and composition is counted and recorded manually by a team of surveyors during the measurement of noise emissions. Each individual is assigned for counting specific vehicle category. The traffic fleet was divided into light traffic and heavy traffic.

The data collection process took place in January 2010 in Taiz city at 55 streets throughout the city (figure 3). Classified traffic count carried out for the 18 hours between 06:00 to 24:00, as well as traffic speed, gradients, percent of heavy vehicles and road surface types are recorded. The data was forecasted for the years 2015 and 2025 using average annual growth rate mentioned above.

In this study, the levels of noise emitted by traffic are measured or predicted using the standard UK method for the Calculation of Road Traffic Noise (CRTN)[9]. All predicted or measured noise levels are expressed in terms of the index  $L_{10}$  hourly or  $L_{10}$  (18-hour) dB (A). The value of  $L_{10}$  hourly dB(A) is the noise level exceeded for just 10% of the time over a period of one hour.

The  $L_{10}$  (18-hour) dB(A) is the arithmetic average of the values of  $L_{10}$  hourly dB(A) for each of the eighteen one-hour periods between 06:00 to 24:00 hours.

Figure 3. – Taiz City Road Network

$$L_{10} \text{ (hourly)} = 42.2 + 10 \log_{10} q, \text{ dBA.} \longrightarrow \quad (1)$$

$$L_{10} (18\text{-hour}) = 29.1 + 10 \log_{10} Q, \text{ dBA.} \longrightarrow \quad (2)$$

Correction for mean traffic speed, percentage of heavy vehicles, surface types and gradient are carried out as per CRTN manual [9].

The correction for percentage of heavy vehicles and traffic speed are determined using the following expressions

$$\Delta_{pV} = 33 \log_{10} \left( V + 40 + \frac{500}{V} \right) + 10 \log_{10} \left( 1 + \frac{5p}{V} \right) - 68.8, \text{ dB(A)}. \quad (3)$$

$$p = \frac{100f}{q} = \frac{100F}{Q} \quad (4)$$

Where  $f$  and  $F$  are the hourly and 18-hour flows of heavy vehicles, respectively.

Equation (3) is applied to the basic hourly or 18-hour levels. The value of  $V$  to be used in equation (3) depends upon whether the road is level or on a gradient.

Once the speed of traffic is known then the adjustment for the extra noise from traffic on a gradient is calculated from

$$\Delta_G = 0.3G, \text{ dBA} \longrightarrow (5)$$

#### 4. Road surface

The noise level depends upon the amount of texture on the road surface. For roads which are impervious to surface water and where the traffic speed used in expression (3) is  $V \geq 75$  km/h a correction to the basic noise level is applied. The correction for concrete surfaces is given by

$$\Delta_{TD} = 10 \log_{10}(90TD + 30) - 20, \text{ dBA} \longrightarrow (6)$$

for bituminous surfaces

$$\Delta_{TD} = 10 \log_{10}(20TD + 60) - 20, \text{ dBA} \longrightarrow (7)$$

where  $TD$  is the texture depth measured by the sand-patch test.

If  $V < 75$  km/h:

- for impervious bituminous road surfaces  $\Delta_{TD} = -1$  dBA;
- for pervious road surfaces  $\Delta_{TD} = -3.5$ .

**Future Noise Levels.** The future noise levels at all sites were predicted using the CRTN method. The year 2025 was selected for the future prediction ( $n=10$  years). The input data needed for predicting future noise levels were assumed to be the same as for the current year 2015. The future traffic flow used in the CRTN method was obtained by applying the following relationship using an annual growth rate of  $r\%$ . This rate is based on the average growth rate of vehicles in Taiz city.

$$F = P(1+i)^n, \longrightarrow (8)$$

where

$F$  = Future predicted traffic volume;

$P$  = Present traffic volume;

$i$  = Rate of growth of vehicles;

$n$  = Number of years.

Table (2) Show the 18 hourly traffic volumes, percentage of heavy vehicles and the calculated link wise noise pollution for the years 2015 and 2025 respectively. It is clear from Table (2) that the noise level at almost all the links for base year as well as future year exceeded the Yemeni ambient noise level.

Figures (4) and (5) show the link wise noise pollution in dB (A) for the years 2015 and 2025. It is clear from figures that the actual noise level exceeded the Yemeni ambient noise standards.

Table 2. – Calculated Link wise noise pollution for the years 2015 and 2025 in Taiz City

Sl.No	Road Name	Stretch Name	LINKWISE NOISE POLLUTION L10(18-hour) dB(A)					
			2015			2025		
			Traffic volume (18-hour)	% Heavy vehicles	Noise pollution	Traffic volume (18-hour)	% Heavy vehicles	Noise pollution
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Jamal Street	Bab Mu-sa/Jamal Street to Mohammed Ali Othaman	28055	0.61	68.6	46872	0.61	70.1
2		Mohammed Ali Othaman to Al Awedhi	29184	0.36	70.5	48779	0.36	72.0
3		Al Awedhi to Al Tehrir	25867	0.35	69.9	43197	0.35	71.4
4		Al Tehrir to Al Muwasalat	32158	0.38	68.7	53732	0.38	70.2
5	Al Herwi Street	Muwasalat to Al Howd	42368	0.46	69.8	70808	0.46	71.3
6		Al Howd to Al Camp	18474	1.04	68.1	30861	1.04	69.6
7	A Qassar Street	Al Kindi Jn to Al Qassar Jn	15401	3.25	68.6	25722	3.25	70.1
8	AL Askari Street	AL Askari Street	14123	0.86	65.5	23608	0.86	67.0
9	Sala Road	Sala Road	6629	0.58	61.7	11085	0.58	63.2
10	New Ring Road	New Ring Road	3501	2.34	61.4	5850	2.34	63.0
11	Saber Road	Saber Road	4727	0.22	60.9	7905	0.22	62.5
12	Al Kahira Castle	Al Kahira Castle	8142	0.18	63.1	13609	0.18	64.6
13	Southern Ring Road	Southern Ring Road	19758	0.52	66.4	33021	0.52	67.9
14	Al Gamian Road	Al Gamian Road *	12808	2.83	66.1	21391	2.83	67.6
15	Bab Musa - Sina Road	Bab Musa - Sina Road	9917	1.25	64.0	16574	1.25	65.5
16	26th September	Bab Al Kabeer Jn to 26th September	12565	0.42	64.3	21016	0.42	65.8
17	Bab Musa	Bab Musa	12510	1.56	66.6	20901	1.56	68.1
18	Aqabat Mufera	Aqabat Mufera *	13396	1.14	66.4	22419	1.14	67.9
19	Wadi Al Qadi	Wadi Al Qadi *	11040	12.31	71.7	18391	12.31	73.2
20	Third Ring Road	Third Ring Road *	13590	9.40	70.0	22651	9.40	71.5

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	Al Qat Road	Al Qat Road *	9689	6.56	66.7	16161	6.56	68.2
22	To Sofitel	Al Rawdha Jn to Sofitel	2899	4.02	60.1	4837	4.02	61.6
23		Al Rawdha Jn to Poweplant Jn	6440	6.52	68.0	10748	6.52	69.5
24	Ussefera	Sinan Jn to Safer Jn	11182	1.31	65.2	18688	1.31	66.7
25		Powerplant Jn to Sinan Jn	18878	2.18	67.3	31534	2.18	68.8
26	Al Tehrir Al Asfal Street	Al Tehrir Al Asfal Street	14466	1.04	65.5	24174	1.04	67.0
27		Al Markazi Jn to Al Asfal St	6126	0.24	61.5	10230	0.24	63.0
28	Mohammed Ali Ottoman	Mohammed Ali Ottoman	10000	0.52	63.5	16716	0.52	65.0
29	Al Awedhi Street	Al Awedhi to Jamal Street	15299	1.21	67.2	25564	1.21	68.8
30	Al Tehrir Up	Al Tehrir up to Jamal Street	5618	1.41	62.8	9390	1.41	64.3
31		Al Nokta Al Raba Jn to Public Park	18567	0.71	66.4	31049	0.71	67.9
32	Soug Assimil	Soug Assimil to Al Howd Jn	2951	0.85	58.4	4933	0.85	59.9
33		Soug Assimil to Al Nokta Al Raba Jn	5001	0.08	60.1	8371	0.08	61.5
34	Aqabat Munif	Aqabat Munif Jn to Al Howd Jn	26851	1.17	71.3	44855	1.17	72.8
35	Al Hawaban	Aqabat Munif Jn to Farzat Sana'a Jn	24265	1.81	68.3	40522	1.81	69.9
36	Al Shab Jn	Al Shab Jn to Al Nokta Al Raba Jn	18206	0.45	70.8	30447	0.45	72.3
37	Ath Thwarah street	Al Kharabah Jn to Aqabat Munif Jn	17734	1.01	66.6	29642	1.01	68.1
38	Ash Shamsi Street	Ath Thawrah Jn to Al Ash-bat Jn	18210	0.98	66.4	30425	0.98	67.9
39	Gawlat Senan Al Baath	Sinan Jn to Al Kharaba Jn	9893	1.21	63.9	16521	1.21	65.4



Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
40		Kharabah Jn to Safer Jn	18003	2.11	67.1	30075	2.11	68.6
41	Al Horaish Street	Safer Jn to Al Horaish Jn	17384	0.88	66.8	29038	0.88	68.3
42	Second Ring Road	Kalabah Jn to 2nd Ring Road	14065	1.41	65.6	23497	1.41	67.1
43	Kalabah Bridge Road	Kalabah Jn to Petrol Pump	8435	6.15	67.0	14058	6.15	68.5
44	Sofitel Road	Petrol Pump to Jumla Market Jn	14397	10.02	73.7	23974	10.02	75.2
45	Soug Al Gomlah Road	Jumla Market Jn to Al Gomlah Jn	14307	6.05	67.9	23880	6.05	69.4
46	Farzat Sanaa Road	Al Qassar Jn to Farzat Sana Jn	38124	3.62	71.1	63644	3.62	72.6
47		Farzat Sana Jn to Kalabah Jn	17907	1.60	66.7	29908	1.60	68.3
48	Al Hawaban Road	Sofitel Jn to Al Qassar Jn	32396	3.85	71.7	54066	3.85	73.2
49	Sofitel Road	Sofitel Jn to Jumla Market Jn	10341	13.51	69.2	17205	13.51	70.8
50	Al Goham Al Qamariyah Road	Al Rawdha Hospital Jn to Kalabah Road	12245	1.52	66.2	20466	1.52	67.7
51	Al Haseeb Road	Saba Phone office to Al Haseeb Road *	38400	3.74	71.5	64091	3.74	73.1
52	26 th September	Al Nokta Al Raba Jn to Tehrir Up	6628	0.90	61.9	11085	0.90	63.4
53	Safer Al Tahrir Al Asfal	Safer Jn to Al Tahrir	11794	0.49	64.3	19699	0.49	65.8
54	Al Masbah Wadi Al Qadi	Wadi Al Qadi to Al Masbah	3265	1.01	59.5	5465	1.01	61.1
55		Mohammed Ali Ottoman Down to Al Masbah	14602	1.19	66.0	24453	1.19	67.6

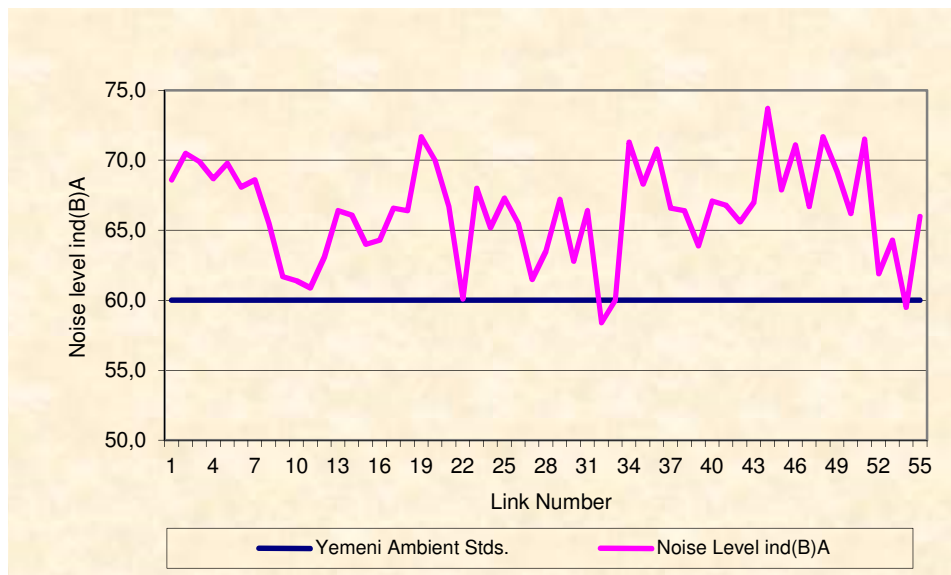


Figure 4. – Link wise Noise Pollution for the year 2015

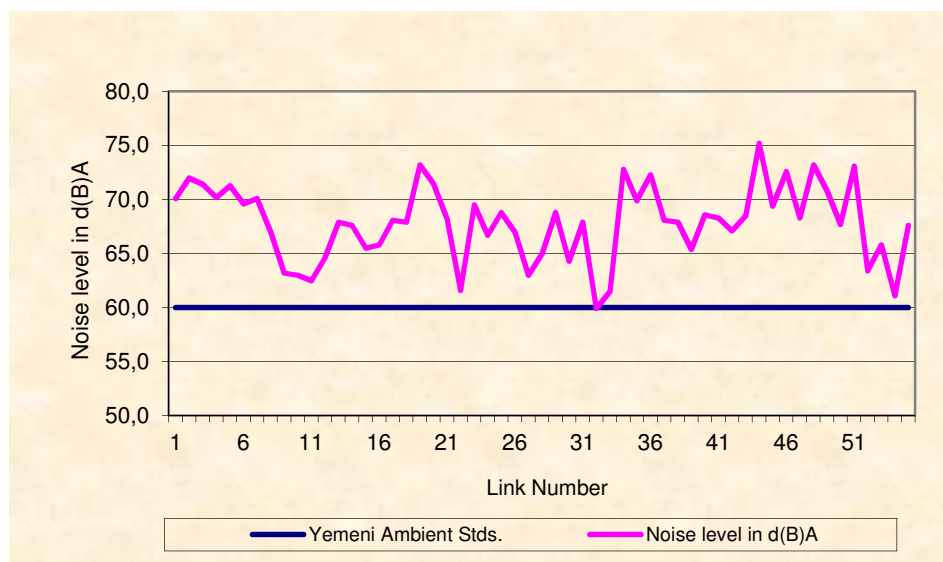


Figure 4. – Link wise Noise Level for the year 2015

**Results and Discussion.** Noise pollution is defined as the generation of unwelcome and displeasing sound in the environment. Among thevarious sources of noise pollution, automobiles and other transport systems contribute the maximum sound production.Because of the other important noise pollutants industrial production systems are negligible in the city, so it is possible to say that the root cause of noise pollution is transportation machines- traffic vehicles in Taiz city. The results showed that Taiz is environmentally noise polluted at all the studied locations, except at two locations, with noise levels ranging between 60.1 and 73.7 dB(A); thereby exceeding the maximum allowable limit of 60 dB(A).

To test the accuracy of CRTN method in Yemen environment, actual noise measurement carried out using sound level meter at 10 locations, the measurement procedure carried out as mentioned above, and it has been found that the difference between measured and calculated noise using CRTN method was within the limit  $\pm 3.0$  dB(A). Hence CRTN methodology can be used for predicting traffic noise level in Yemen.

The CRTN method was also employed to predict future noise levels throughout the city for the year 2025 which were found to be higher than the current predicted noise levels as shown in table (2) above. The results clearly show that the noise levels for the year 2025 found to be higher than the current predicted noise levels.

**Adverse health effects of noise pollution.** The World Health Organization (WHO) has documented seven categories of adverse health effects of noise pollution on humans [10]:

- 1- Hearing impairment.
- 2- Interference with spoken communication.
- 3- Sleep disturbances.
- 4- Cardiovascular disturbances.
- 5- Disturbances in mental health.
- 6- Impaired task performance.
- 7- Negative social behavior and annoyance reactions.

**Control of Traffic Noise.** Techniques available for control of traffic noise can be considered under the following headings[2]:

- 1- Changes in design of vehicles.
- 2- Changes in tyres and road surfaces.
- 3- Elimination of noisier vehicles.
- 4- Modifications in traffic operation.
- 5- Designing streets, buildings and areas for produces less noise.

**Conclusion.** Regarding the data achieved during noise measurement and the high equivalent noise level in all the streets in the city, implementing strategies to control the noise in Taiz city necessary. The results proved that noise pollution must be devoted more attention and reached serious levels and it has become one of the major environmental problems. Therefore, protections related to planning, technical, legislative and educational issues should be taken in order to avoid negative effects of noise pollution on the environment and human beings. In addition, the awareness of the population about the risk of noise pollution.

## REFERENCES

1. London Noise Survey, H.M.S.O., London, U.K. 1968.
2. Kadiyali, L.R. Traffic Engineering and Transport Planning / L.R. Kadiyali/ – Khanna Publisher, 2000.
3. POWH (OHS) Unit: Noise Management Handbook, 2010.
4. Implementation List of the Environmental Protection Law, Yemen. 2005.
5. Pettersson, B. Indoor noise and high sound levels- a transcription of the Swedish national board of health and welfare's guidelines / B. Pettersson // J. of Sound and Vibration. – 1997. – 205 (4). – P. 475-480.
6. Khan, M.M. Traffic noise pollution in Karachi, Pakistan, / M.M. Khan, M.A. Memon, M.N. Khan // JLUMHS. – 2010. – Vol. 9. –P.114–120.
7. Central Statistical Organization. Statistical year book. Sana'a, Republic of Yemen: Ministry of Planning and International Cooperation (1996–2008).
8. Comprehensive Traffic Management study for Sana'a (Environment and Social Assessment). – 2007. – Vol. 2, Team International.
9. Department of Transport and Welsh Office. Calculation of Road Traffic Noise. HMSO, London, 1988.
10. Berglund B, Lindvall T. (Eds.) Community Noise. Archives of the Center for Sensory Research. 1995; 2: 1-195. This document is an updated version of the document published by the World Health Organization in 1995. Available at: <http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>. Accessed January 6, 2007.

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ БУРЕНИЯ ШПУРОВ И СКВАЖИН В ГРУНТ ОСНОВАНИЯ

В.П. Чернюк, Е.И. Шляхова

Брестский государственный технический университет, Беларусь

email: patent@bstu.by

*Предложено высокоэффективное и производительное устройство для бурения шпуров и скважин в грунте основания (от слабых и рыхлых до прочных и скальных грунтов), защищенное патентом РБ на изобретение. Устройство выполнено из цельного металлического стержня квадратного поперечного сечения с ручным механизмом привода в виде ворота, стержень на его нижнем конце разделен двумя сквозными взаимоперпендикулярными в плане прорезами на четыре режущих элемента, скрученных на 360° относительно продольной оси стержня и сжатых по вертикальной оси стержня с образованием накопителя. Устройство работоспособно, изготовлено в натуральную величину в обычной кузнечной мастерской, испытано в производственных условиях.*

*Ключевые слова: скважина, прорезы, бурение, шпур, стержень, режущие элементы.*

## DEVICE FOR DRILLING SHEARS AND WELLS IN THE GROUND

V. Chernuk, E. Shlyahova

Brest State Technical University, Belarus

email: patent@bstu.by

*A highly efficient and productive device for drilling holes and wellss in the ground (from weak and loose to strong and rocky grounds) is proposed, protected by a patent of the Republic of Belarus for an invention. The device is made of a single-piece metal rod of square cross-section with a drive mechanism in the form of a gate, the rod at the bottom is divided by two through-perpendicular in plan slots into four cutting elements, twisted on 360 degrees relative to the longitudinal axis of the rod and compressed along the vertical axis of the rod to form a hoarder. The device is working, is made in full size in a forge, is tested in production conditions.*

*Keywords: well, slots, drilling, blast-hole, rod, cutting elements.*

Существует значительное количество видов буровых работ и способов бурения в различных областях народного хозяйства и отраслях техники, а еще больше имеется разнообразных ручных и механизированных инструментов, машин и механизмов, станков и установок, предназначенных для бурения, от весьма простых и примитивных до самых сложных [1].

В прошлом с бурением были связаны имена М.В. Ломоносова, Д.И. Менделеева, С.М. Кирова и др.

В БрГТУ также разработано несколько устройств и приспособлений для бурения шпуров и скважин в грунте (от рыхлых и слабых до прочных и скальных). Это патенты РБ на изобретения № 9161, № 14103 и полезные модели № 1723, № 7763 и др. [2].

Оригинальным по простоте изготовления и эффективным по производительности бурения является техническое решение, предложенное сотрудниками кафедры ТСП университета и защищенное патентом РБ на изобретение № 21333 «Земляной бур с накопите-

лем» [3]. В настоящее время авторами изготовлен и испытан опытный образец устройства, положительно зарекомендовавший себя в практике бурения.

Сущность данной разработки поясняется двумя чертежами и фотоснимком, где на рис. 1 изображен общий вид устройства в аксонометрии с изогнутым в профиле и закрученным на  $360^\circ$  в плане земляным буром с накопителем, на рис. 2 – общий вид в аксонометрии металлического стержня квадратного сечения, разделенного двумя сквозными взаимоперпендикулярными продольными в плане прорезями на четыре режущих элемента, до изготовления бура с накопителем. На фотоснимке показан общий вид изготовленного в натуральную величину изогнутого и закрученного на  $360^\circ$  (или один оборот) земляного бура с накопителем без ворота для вращения.

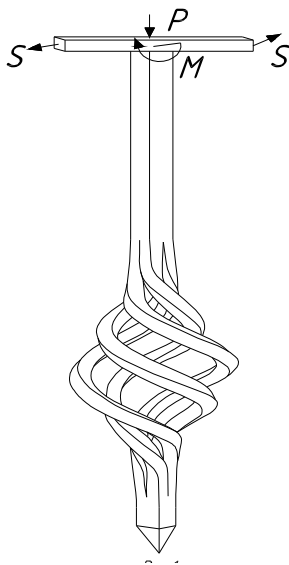


Рисунок 1

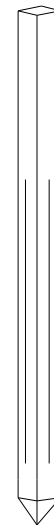


Рисунок 2

Устройство для бурения шпура или скважины состоит из периодически погружаемого в грунт и извлекаемого из него земляного бура (рис. 1) с ручным механизмом привода в виде ворота. Бур выполнен из металлического стержня квадратного поперечного сечения. В качестве такого стержня может быть успешно использован выпускаемый отечественной промышленностью типовой металлический прокатный профиль сечением, например,  $1,5 \times 1,5$  см, любой длины (рис. 2). Стержень разделен двумя сквозными взаимоперпендикулярными в плане прорезями (на его нижнем конце) на четыре режущих элемента, скрученных на  $360^\circ$  относительно продольной оси стержня и сжатых по вертикальной оси стержня с образованием накопителя (см. фотоснимок). Верхний конец стержня соединён с воротом для вращения, а нижний - заострен для успешного бурения и погружения в грунт. Несмотря на сложные формы и конфигурацию, бур с накопителем (рис. 1) достаточно легко и просто изготавливают в любой кузнечной мастерской или кузнице в горячем состоянии посредством нагрева металла стержня с прорезями до покраснения путём сдавливания под прессом и прокручиванием на  $360^\circ$  верхней части стержня относительно нижней. В результате после закалки получается толстый (уширенный), разрезной, закрученный накопитель вместе со стержнем, изображённый на рисунке 1. Таким образом, образуется земляной бур с двумя прорезями и накопителем с четырьмя режущими элементами из металлического стержня квадратного сечения. Нижнюю часть стержня заостряют, а к верхней приваривают ворот для вращения.



Рисунок 3

Такая конструкция земляного бура с накопителем (рис. 3) была изготовлена авторами и успешно испытана в производственных (полевых) условиях. Это металлический стержень квадратного сечения 1,5х1,5 см, длиной 2 м, заостренный снизу и снабженный воротом. Диаметр уширенной части бура (накопителя) составляет 75-100 мм, а угол закрутки – 360°, т.е. один оборот (см. прилагаемый фотоснимок в натуральную величину).

Механизм, приводящий бур во вращение, включает в себя стержень с приваренным к нему ручным воротом. Бурение шпуров и скважин в любом грунте (прочном, плотном, рыхлом) и во льду осуществляется следующим образом.

Осевым усилием  $P$  и усилием заворачивания  $S$ , создающим крутящим моментом  $M$ , земляной бур за ворот и стержень погружают в грунт. Проворачиваясь в грунте или скважине, острые режущие элементы, аналогично лопастям, разрушают окружающий грунт (благодаря осевому усилию  $P$  и крутящему моменту  $M$ ), который дальше осыпается в бур и образованный режущими элементами накопитель, постоянно заполняемый грунтом в процессе бурения скважины. После заполнения накопителя грунтом бур вместе с накопителем вынимается из скважины за ворот или стержень и разработанный грунт из накопителя высыпается на поверхность земли. Далее цикл бурения скважины и извлечения грунта повторяется многократно вплоть до полной глубины образования скважины. В целом технология бурения скважин в грунте и во льду предлагаемым устройством аналогична технологии бурения скважин известными способами – вращение с осевым усилием, разрушение грунта, наполнение накопителя, выемка бура с грунтом со скважины, высыпка (выгрузка) грунта на поверхность земли.

Предлагаемое буровое устройство имеет высокую производительность и эффективность бурения по следующим причинам: наличие четырех режущих элементов (лопастей), множество режущих острых граней, наличие емкого накопителя, представляющих собой в совокупности толстый винт или сверло диаметром 75-100 мм с длинным хвостовиком (до 2-3 метров), способным резать, собирать, транспортировать, вынимать и выгружать разработанный в скважине грунт. Подобных простых буров и буровых установок отече-

PolotskSU

ственная промышленность (и за рубежом) не выпускает. Имеющиеся станки, машины и механизмы вращательного, ударно-вращательного, колонкового, шнекового, шарошечного, роторного и чисто вибрационного ударного бурения весьма громоздки, сложны, малопродуктивны, а в прочных и скальных грунтах – капризны и ненадежны. Другое дело – предлагаемое устройство, здесь имеется только одна деталь – изогнутый по винту стержень (бур) с воротом (он же и накопитель). Глубина бурения скважин небольшого диаметра может достигать 5–10 м.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов, В.Е. Бурение?... Интересно! / В.Е. Копылов. – М. : Недра, 1981. – 160 с.
2. Чернюк, В.П. Производство свайных работ в особых условиях строительства / В.П. Чернюк, П.П. Ивасюк. – Deutschland (Германия, LAP LAMBERT Academic Publishing), 2016. – 195 с.
3. Земляной бур с накопителем : МПК Е 21 В 10/42 / В.П. Чернюк [и др.] ; дата публ. 30.10.2017.

## ВОПРОСЫ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ БЕТОНОВ С БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРОЙ

*Е.И. Шляхова, Н.В. Левчук*

Брестский государственный технический университет, Беларусь

email: patent@bstu.by

*В статье затрагиваются вопросы воздействия внешних агрессивных факторов на долговечность и эксплуатационные свойства строительных материалов, в частности бетонов, и показаны преимущества применения композиционных материалов с использованием базальтовой фибры, что в значительной степени позволяет решать проблемы ресурсосбережения.*

*Ключевые слова: долговечность, базальтовая фибра, ресурсосбережение, композиционный материал, бетон.*

## THE ISSUES OF RESOURCE AND ENERGY SAVING UPON OBTAINING CONCRETE WITH BASALT FIBER

*E. Shlyahova, N. Levchuk*

Brest State Technical University, Belarus

email: patent@bstu.by

*In the article here have been touched the issues of the external aggressive factors influence on durability and serviceability of building materials, concrete in particular, and there have been shown the advantages of appliance the compositional materials with the use of basalt fiber which allows to settle the problems of efficient use of resources to a considerable degree.*

*Keywords: durability, basalt fiber, efficient use of resources, compositional materials, concrete.*

При увеличении срока службы строительного материала акцент делается на решение основных, глобальных экологических проблем - ресурсосбережение и предотвращение загрязнения окружающей среды при строительстве. При этом, долговечность и надежность – это главные понятия, характеризующие способность строительного материала к противостоянию внешним агрессивным факторам техносферы. В то же время долговечность – это способность сохранять свои эксплуатационные свойства до предельного состояния с необходимыми перерывами на ремонт. Ее измеряют обычно сроком службы без потери эксплуатационных качеств в конкретных климатических условиях и режиме эксплуатации [1].

Таким образом, приоритетными являются задачи не только эстетические и инженерные, но и эколого-материаловедческие, позволяющие обеспечить выбор долговечных, экологически безопасных строительных материалов и их использование при проектировании экологически комфортных зданий.

Основными причинами деструкции пористых строительных материалов, в том числе природного и искусственного камня, являются частые осадки и сезонные изменения температуры, вызывающие интенсивный приток влаги и растворенных в ней солей.



Постоянный приток агрессивных веществ от кислот, до солей, образующихся в результате реакций оксидов серы и углерода  $\text{Ca}^{2+}$ , приводит к быстрому и интенсивному разрушению бетонов и силикатных материалов, как на поверхности, так и внутри. Разрушающий потенциал постоянно повышается за счет солей кристаллизующихся и образующихся под поверхностью. При воздействии влаги растворимые соли переходят в жидкую фазу и мигрируют по капиллярам в пористую структуру камня. При высыхании они вновь концентрируются под поверхностью, приводя к ускоряющемуся разрушению поверхности материала. Диоксид углерода, реагируя с водой, образует угольную кислоту, которая с атмосферными осадками проникает в строительный материал, прежде всего поровую структуру.

Создание общих новых композиционных материалов, способствующих повышению надежности и долговечности строительных материалов, благодаря использованию добавок, в том числе различных фибр, участвующих в хемосорбционных процессах, позволяет снизить водопоглощение и пористость искусственного камня.

Особое место среди армирующих добавок в бетоны занимает базальтовая фибра, технология введения которой, а также ее количественное содержание в бетонных композициях, влияние на формирование структуры и свойства цементных растворов и бетонов вызывает как интерес, так и противоречие.

Введение базальтовой фибры способствует уменьшению, как капиллярных пор, так и порового пространства в целом. В результате чего улучшаются и теплоизоляционные свойства, как силикатных материалов, так и портландцементных бетонов.

Применение базальтовой фибры, помимо улучшения прочностных свойств искусственного камня, значительно снижает стоимость строительного материала, так как позволяет получить его без использования дорогостоящих пластифицирующих добавок.

Кроме того, базальтовое волокно обладает уникальной химической стойкостью в растворах щелочей. Это способствует широкому применению базальтовой фибры для армирования бетонных конструкций, асфальтобетонных покрытий дорог, наливных полов, где воздействие влаги, растворов солей и щелочных бетонных сред приводит к коррозии металлической арматуры. Замена металлической арматуры базальтовым волокном значительно удешевляет себестоимость строительных блоков, панелей, перекрытий, кроме того, производство химически стойких труб, защитных покрытий, не горючих композиционных материалов создает условия для долговременной эксплуатации хозяйственных объектов и сооружений, с применением этих материалов.

А также, использование базальтовых волокон решает проблему энерго- и ресурсосбережения за счет повышения теплозащитных функций в совокупности с обеспечением требуемой долговечности. В настоящее время широко используются теплоизоляционные изделия из базальтовых волокон на основе неорганических связок при температурах до 7000 С. Кроме того, существует ряд составов на основе базальтовых пород, обладающих более высокой термостойкостью до 8000 С [3].

Базальтовое волокно имеет высокую совместимость с другими материалами, такими как металл, пластмасса, пластика. Это открывает широкую перспективу производства целого спектра армированных композиционных материалов и материалов с новыми свойствами.

В настоящее время ведется работа по получению новых композиционных материалов, обладающих теплоизоляционными характеристиками. Для изучения теплоизоляционных свойств предварительно проводятся исследования физико-химических характеристик полученных композитов. Для этого исследуется адсорбционная способность

волокна, прочностные характеристики новых материалов и продолжается поиск и разработка энерго- и ресурсосберегающих технологий по изучению данных материалов.

Нами разработан композиционный самоупрочняющийся состав бетона, армированный базальтовой фиброй и затворенный раствором коллоидного гидроксида алюминия, обладающий высокими физико-механическими свойствами, при использовании доступных технологий и экономии ресурсов, а также увеличению сроков эксплуатации бетонов [4].

Исследования показали, что при обработке базальтовой фибры раствором коллоидного гидроксида алюминия прочностные показатели образцов за 28 суток твердения возрастают на 23% относительно контрольной серии образцов. Увеличение прочности образцов на изгиб можно объяснить одновременным влиянием коллоидного гидроксида алюминия на хемосорбционные процессы базальтового волокна и на ускорение процессов растворения и химического взаимодействия минералов портландцементного клинкера с коллоидным гидроксидом алюминия.

Для более точной оценки влияния базальтовой фибры следует предположить, что для получения образцов с еще лучшими физико-механическими свойствами необходимо вводить в состав бетонов базальтовую фибру различной степени дисперсности, которая будет выполнять функции модифицирующей и армирующей добавки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Строительное материаловедение : учеб. пособие / под общ. ред. В.А. Невского. – Изд. 3-е, доп. и перераб. – Ростов н/Д : Феникс, 2010. – 588 с.
2. Фрессель, Ф. Ремонт влажных и поврежденных солями строительных сооружений / Ф. Фрессель. – М. : Медиа, 2006. – 320 с.
3. Оснос, С.П. О характеристиках базальтовых волокон и областях их применения / С.П. Оснос // Техника и технология теплоизоляционных материалов из минерального сырья : доклады 4-й Всерос. науч.-практ. конф. – М. : ЦНИИХМ, 2006. – С. 183–189.
4. Левчук, Н.В. Физико-химические и технологические аспекты применения базальтовой фибры / Н.В. Левчук, Е.И. Шляхова // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Строительство и архитектура. – 2017. – № 1. – С. 135–138.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СЦЕПЛЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

А.В. Замировский

Брестский государственный технический университет, Беларусь

email: studiaformanta@yandex.ru

*Проектирование конструкций с комбинированным армированием невозможно без описания характеристик сцепления композитной арматуры с бетоном. В статье выполнен обзор проблем, связанных с реализацией известных методик определения характеристик сцепления композитной арматуры, описана собственная методика испытаний и изложены результаты ее практического применения. В заключении доклада делаются выводы о возможности дальнейшего применения предложенной методики испытаний.*

*Ключевые слова: прочность сцепления арматуры с бетоном, композитная арматура, методика испытаний, испытательная установка.*

## BOND BEHAVIOR BETWEEN FRP REINFORCEMENT AND CONCRETE IN CONDITIONS OF STATIC LOADING

A. Zamirovski

Brest State Technical University, Belarus

email: studiaformanta@yandex.ru

*Design of structures with combined reinforcement is impossible without a description of the characteristics of bonding behavior between reinforcement and concrete. The article reviewed the problems associated with the implementation of existing testing methods of determining the bond characteristics of FRP; suggested own testing method; described the results of practical application of the described testing method. In the conclusion some issuers about the possibility of further application of the proposed testing method were figured.*

*Keywords: bond behavior between reinforcement and concrete, FRP tiles, test methodology, testing machine.*

**Введение.** В настоящее время предложено довольно много способов ингибирования коррозии стали в железобетонных конструкциях. В реальной практике производства эти способы оказываются неэффективными либо капиталоемкими [1]. В связи с этим для армирования конструкций из бетона, эксплуатирующихся в условиях агрессивной окружающей среды, а также конструктивных элементов зданий специального назначения, применяются композитные стержни (англ. *fiber-reinforced polymer composite* – FRP).

Очевидно, что элементы с комбинированным армированием имеют качественные преимущества над элементами, в которых используется исключительно металлическая либо неметаллическая арматура. За счет стальной арматуры повышаются жесткостные характеристики элемента и ограничивается ширина раскрытия трещин в эксплуатационной стадии. По мере нагружения, после достижения текучести в стальной арматуре, прирост усилия достигается за счет активного включения в работу неметаллической арматурой. [2]

При проектировании элементов с комбинированным армированием принимается так называемая блочная расчетная модель. При формулировании положений данной расчетной модели [3, 4] рассматривается блок, выделенный соседними трещинами. Статическая задача в общем случае решается с использованием модифицированных положений деформационной модели. Исходными данными при решении такой задачи является система уравнений (уравнения равновесия продольных сил, уравнения равновесия моментов, уравнения равновесия для отдельного стержня, уравнения для проскальзывания), которая в свою очередь дополняется диаграммами деформирования для материалов " $\sigma_c - \varepsilon_c$ ", " $\sigma_s - \varepsilon_s$ ", " $\sigma_f - \varepsilon_f$ " и диаграммами, связывающими величину касательных напряжений  $\tau$  с величиной проскальзывания  $s$ .

В соответствии с ModelCode 2010 [5] приводится общий вид диаграммы " $\tau_f - s_f$ " с аналитическим описанием, а параметрические точки диаграммы, описывающей закон сцепления композитной арматуры с бетоном, могут быть определены исключительно опытным путем.

Известные методы определения характеристик сцепления композитной арматуры с бетоном, позволяющие определить значения параметрических точек, являются неточными либо малоэффективными. Так, например, широкое распространение получила методика «*pull-out test*», описанная в стандарте RILEM/CEB/FIB [6] (аналогичная по своим принципам методика изложена в Приложении Д ГОСТ 31938-2012 [7]). Популярность этой методики обусловлена, неявным образом, ее простотой.

Согласно методике образец представляет собой бетонный куб или призму, в который заделывается композитный арматурный стержень. Длина заделки принимается пропорциональной диаметру силового стержня. Образец устанавливается на неподвижную опорную стальную плиту. Между бетонным образцом и стальной пластиной предусмотрена прокладка из резины или древесины, основной функцией которой является устранение неровностей бетонной поверхности образца и сглаживание локальных контактных напряжений. Порядок проведения испытаний следующий: к свободному концу композитного стержня, параллельно его продольной оси, прикладывается усилие. Прикладываемое усилие увеличивают пропорционально на каждом этапе испытаний, фиксируя при этом смещения точек арматурного стержня.

К существенным недостаткам данной методики можно отнести то, что с ее применением испытание арматурных стержней больших диаметров невозможно. Кроме того, проведение эксперимента по методике «*pull-out test*» характеризуется повышенными экономическими затратами. Все эти факторы осложняют получение исходных данных, необходимых для проектирования конструкций с комбинированным армированием.

**Методика исследований.** С целью устранения вышеописанных недостатков на базе методики «*pull-out test*» была разработана усовершенствованная методика испытаний. Принципиальная схема реализации разработанной методики и аксонометрическая схема испытательной установки [8] изображены на рисунке 1.

В разработанной методике испытаний образец 3 представляет собой арматурный стержень обоими концами заделанный в бетон. Бетонные элементы образца имеют форму правильных четырехугольных призм. При изготовлении образцов длина заделки регулируется при помощи вкладышей (ПВХ трубка). Усилие, прикладываемое к образцу, создается за счет домкратов 2. Растягивающее усилие распределяет опорная плита 4, являющаяся элементом конструкции траверс 1. Для устранения неровностей бетонной поверхности

между образцом и опорной плитой и сглаживания локальных контактных напряжений устанавливаются резиновые прокладки 5. Проскальзывание свободных концов арматурного стержня, а так же проскальзывание арматурного стержня со стороны приложения нагрузки измеряют при помощи индикаторов перемещений часового типа 8 (снятие показаний индикаторов производят на каждом этапе нагружения образца).

Для изготовления опытных образцов использовали композитную арматуру трех типов. Основные физико-механические характеристики использованных арматурных стержней более подробно приведены в таблице 1.

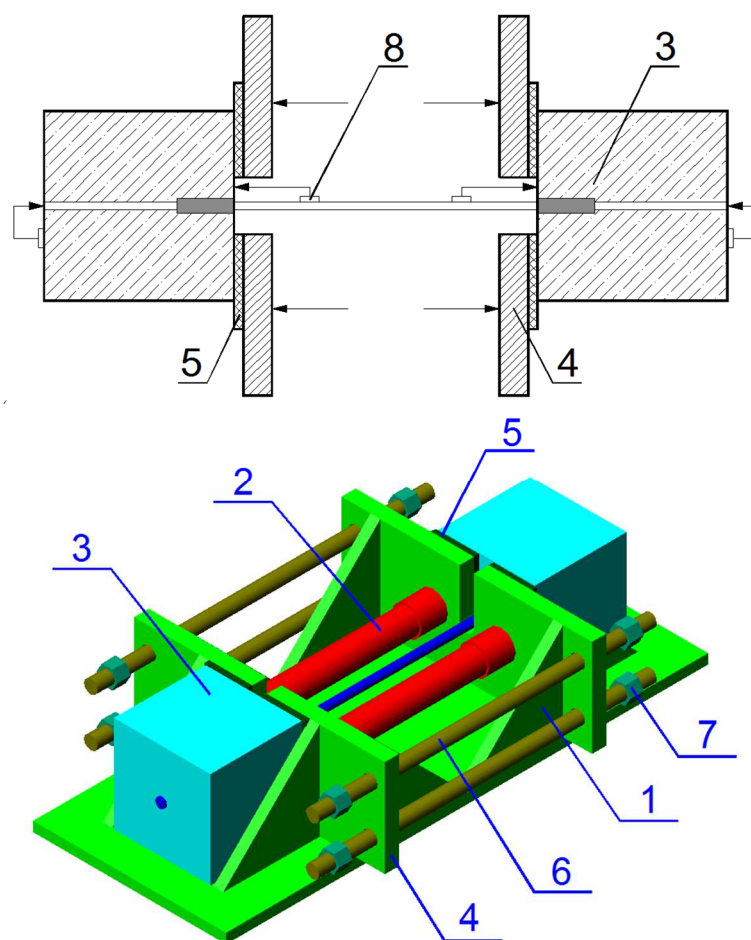


Рисунок 1. – Принципиальная схема разработанной методики испытаний и схема испытательной установки в аксонометрии [8]:

1 – траверса; 2 – домкрат; 3 – образец; 4 – опорная плита; 5 – резиновая прокладка; 6 – стальной стержень; 7 – гайка; 8 – индикаторы перемещений; ➔ направление приложения растягивающего усилия

Из древесностружечных плит были изготовлены формы для образцов. Формы смазывали, а затем в них устанавливались арматурные стержни. Бетонную смесь приготавливали в бетономесителе гравитационного типа. Уплотнение бетонной смеси осуществляли при помощи глубинного вибратора. Дополнительно на основе каждого замеса изготавливалось по 3 контрольных образца-куба с размерами граней 100x100x100 мм, предназначенных для контроля прочности бетона. Набор прочности этих образцов проходил в тех же температурно-влажностных условиях, что и набор прочности опытных образцов основной испытательной программы. Всего, для изучения характеристик сцепления композитной арматуры с бетоном было изготовлено 15 образцов.

Таблица 1. – Основные физико-механические характеристики арматурных стержней

Условное обозначение	Материал арматурного стержня	Номинальный диаметр $d_n$ , мм	Диаметр силового стержня $d$ , мм	Тип обработки поверхности	Предел прочности $\sigma$ , МПа	Модуль упругости $E_r$ , МПа
#6 С	Стекло-пластик	6	5,2	Оплетка	1300	45500
#8 С		8	7,4	Оплетка	1300	45500
#10 С		10	8,6	Оплетка	1300	45500
#12 С		12	11,1	Оплетка	1300	45500
#6 Б	Базальто-пластик	6	5,8	Песчаная посыпка	1200	50000

**Результаты испытаний.** Напряжения сцепления арматуры с бетоном  $\tau$  (МПа) на каждом этапе приложения нагрузок вычисляли по формуле (1):

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot D_d \cdot l_d} \quad (1)$$

где  $P$  – усилие (Н) приложенное к образцу на этапе нагружения;

$D_d$  – диаметр силового стержня, мм;

$l_b$  – длина заделки стержня в бетон, мм.

По результатам испытания каждого образца строили диаграммы " $\tau - s$ ".

Показания индикаторов, расположенных на свободных концах арматурного стержня испытываемого образца, в дополнительной обработке не нуждались. Показания индикаторов, фиксирующих проскальзывание арматурного стержня со стороны приложения нагрузок, представляли собой сумму величины удлинения стержня в результате приложения нагрузки и величины проскальзывания соответствующих точек композитной арматуры:

$$s_{le} = s_t - s_c \quad (2)$$

где  $s_t$  – показания индикатора перемещений часового типа, мм;

$s_c$  – упругое удлинение арматурного стержня, мм.

Упругие удлинения арматурного стержня  $s_c$  вычисляли как

$$s_c = \frac{P \cdot L}{E_r \cdot A_r} \quad (3)$$

$L$  – расстояние от точки крепления индикатора часового типа до заделки, м;

$A_r$  – площадь поперечного сечения силового стержня, мм<sup>2</sup>;

$E_r$  – модуль упругости арматурного стержня, МПа.

Ниже приводятся диаграммы " $\tau - s$ " построенные на основе полученных экспериментальных данных (рис. 2). Так как создание жесткого режима нагружения ввиду технических особенностей силового оборудования представлялось невозможным, эти диаграммы описывают закон «напряжение сцепления-проскальзывание» для композитных арматурных стержней на начальной стадии нагружения образца (так называемой упругой стадии деформаций). *Сплошная линия* на диаграмме описывает закон проскальзывания арматуры полученный на основе регрессионного анализа (в качестве аппроксимирующей принята линейная функция); *пунктирная линия* – на основе теории сцепления композитной арма-

туры с бетоном изложенной в [9] (параметрические точки определены с использованием результатов проведенных экспериментов).

**Влияние прочности бетона на характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном.** В подавляющем большинстве случаев при достижении предельного напряжения сцепления арматуры с бетоном наблюдалось разрушение анкерного слоя арматуры (рис. 3).

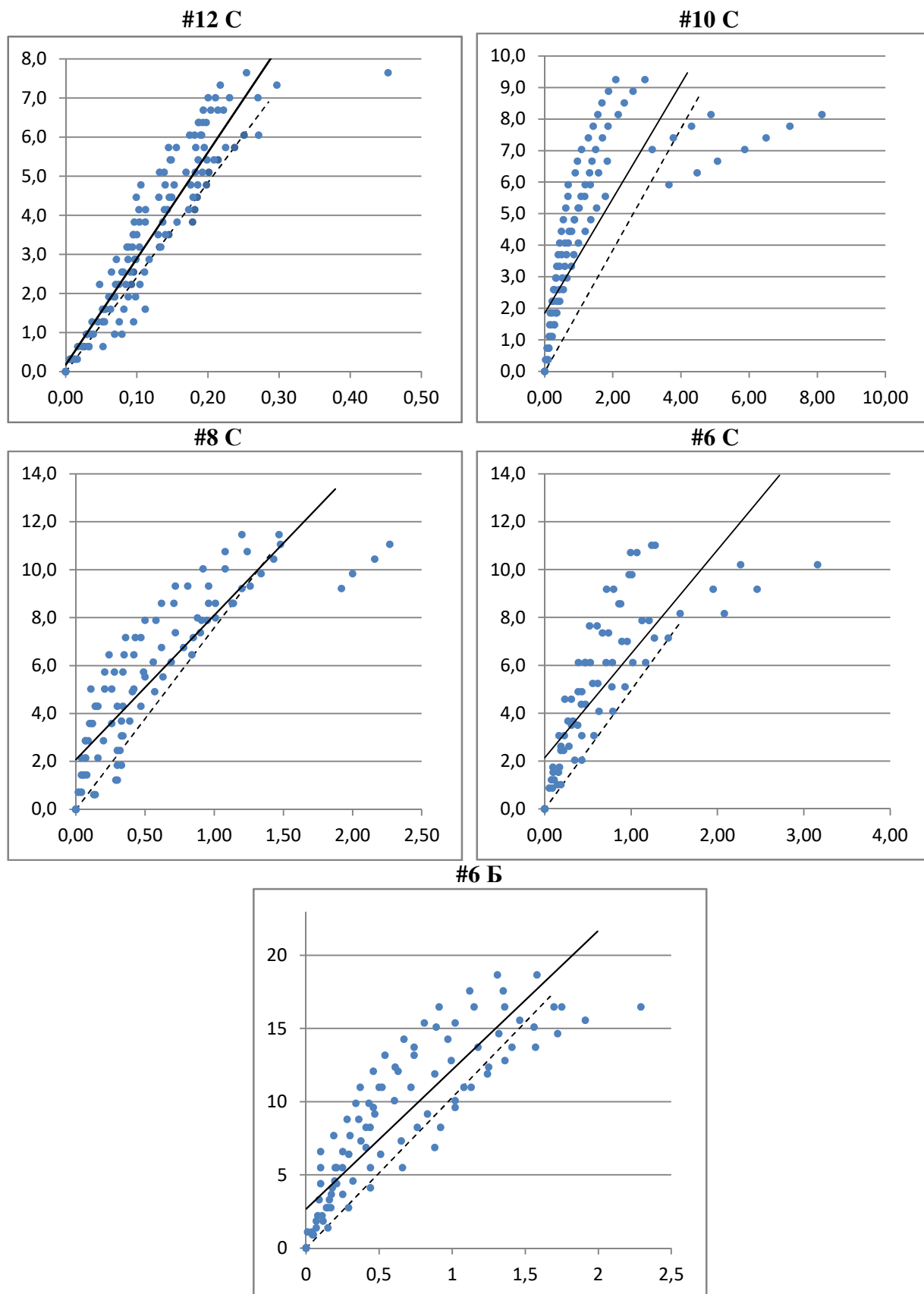


Рисунок 2. - Диаграммы "τ-s" для точек образца, расположенных со стороны приложения нагрузок



Рисунок 3. – Общий вид образца #12С после испытаний

Однако в образцах со стержнями номинальным диаметром 12 мм наблюдали раскалывание бетонного образца вдоль оси арматурного стержня. На рисунке 4 показан график зависимости прочности сцепления арматуры с бетоном в зависимости от прочности бетона образцов при сжатии.

Принимая во внимание характер разрушения испытанных образцов, а также полученные значения предельных напряжений сцепления в зависимости от прочности бетона можно заключить следующее: для образцов, имевших среднюю прочность бетона в диапазоне от 37,4 МПа до 63,2 МПа не удалось выявить однозначной зависимости максимального напряжения сцепления от прочностных свойств бетона.

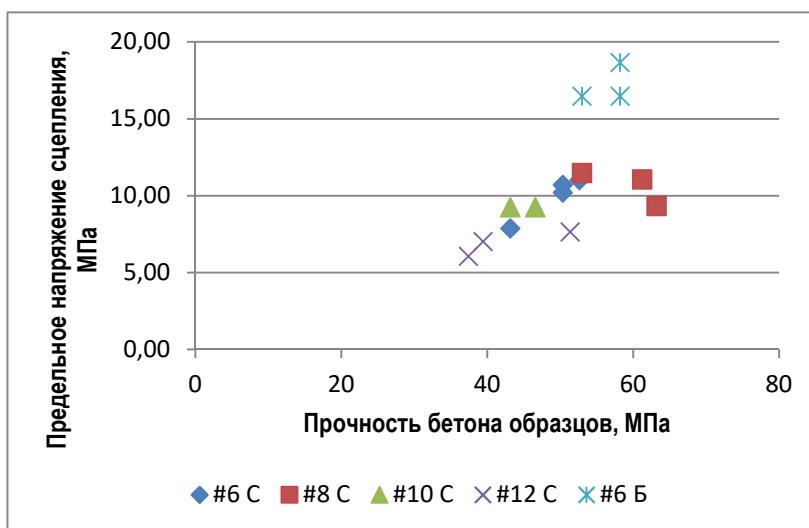


Рисунок 4. – Зависимость предельного напряжения сцепления от прочности бетона на сжатие

**Влияние диаметра арматурного стержня на характеристики сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном.** Анализируя полученные результаты (рис. 5) можно сделать вывод о том, что с увеличением диаметра арматурных стержней, имеющих одинаковую геометрию анкерного слоя, прочность сцепления арматуры с бетоном снижается. Для использованных в работе стеклопластиковых арматурных стержней можно говорить о близком к линейному характере такой зависимости.

**Влияние типа поверхности арматурного стержня на характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном.** Из полученных результатов видно, что прочность сцепления базальтопластиковых арматурных стержней значительно выше прочности сцепления стеклопластиковых стержней. При этом физико-механические характеристики обоих типов стержней являются схожими. Таким образом, тип поверхности базальтопластиковых арматурных стержней (песчаная посыпка) обеспечивает более надежные условия сцепления. Средняя предельная прочность сцепления базальтопластиковых арматурных стержней



(номинального диаметром 6 мм) больше средней предельной прочности сцепления стеклопластиковых арматурных стержней (номинального диаметром 6 мм) на 73%.

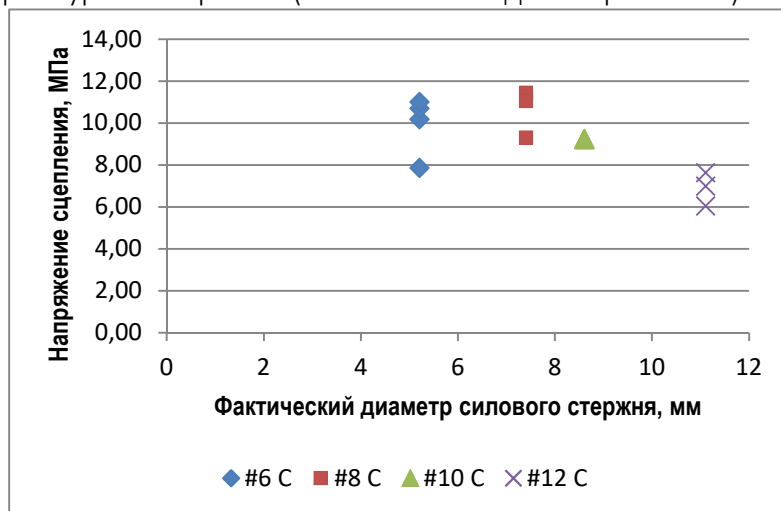


Рисунок 5. – Графическая интерпретация изменения значений предельного напряжения сцепления от фактического диаметра силового стержня

**Заключение.** Результаты, полученные с использованием разработанной методики испытаний, хорошо согласуются с результатами, описанными в других литературных источниках. Аналогичные результаты описывающие влияние прочности бетона на характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном получены в исследованиях [10, 11]; близкие результаты относящиеся к оценке влияния диаметра арматурного стержня на характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном получены в [12, 13]; аналогичные результаты касательно влияния геометрии анкерного слоя на характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном получены в исследованиях [11]; значения предельного напряжения сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном сопоставимы со значениями, полученными в [10, 11, 12, 13]. Таким образом предложенная методика испытаний, как и сконструированная испытательная установка, являются хорошей альтернативой методике испытаний изложенной RILEM/CEB/FIB, устраняющей ряд недостатков свойственных ее реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zhao, W. Crack and deformation behaviour of FRP reinforced concrete structures, PhD Thesis, University of Sheffield. 1999
2. Тур, В.В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием стеклопластиковыми и стальными стержнями / В.В. Тур, В.В. Малыха // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будовлі та споруди : зб. наукових праць. – Рівне, 2012. – Вип. 24. – С. 271–281.
3. Manfredi, G. A refined R.C. beams elements including bond-slip relationships for the analysis of continuous beams / G. Manfredi, M. Pecce // Computer and Structures. – 1998. – Vol. 69, Is. 1. – P. 53–62.
4. Iyer, S.L. Advanced Composites Materials in Civil Engineering Structures / S.L. Iyer, R. Sen // American Society of Civil Engineers: Specialty Conference. – NY, 1990.
5. ModelCode 2010.
6. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия : ГОСТ 31938-2012.
7. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия : ГОСТ 1544-2005.

8. Пат. 11559 Респ. Беларусь : № и 20170104 / В.В. Тур, А.В. Замировский, Е.В. Шляхова ; заявл. 20.03.2017.
9. Baena M., Torres L., Turon A., Barris C. 2009. Experimental study of bond behavior between concrete and FRP bars using a pull-out test. *Composite Part: B* 40 (8) : 784–797.
10. Nanni, A., Al-Zahrani, M.M., Al-Dulaijan, S.U., Bakis, C.E., Boothby, T.E..Bond of FRP reinforcement to concrete - experimental results. In: Taerwe, L., editor. *Second International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. 1995, p. 135–145.
11. Lee, J.Y., Kim, T.Y., Kim, T.J., Yi, C.K., Park, J.S., You, Y.C., et al. Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete. *Composites Part B-Engineering* 2008; 39(2): 258–270. [25] CSA S806-02. *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*. CSA Standard, Canadian Standards Association. Canada. 187 p. 2002.
12. Freimanis, A.J., Bakis, C.E., Nanni, A., Gremel, D.A..A comparison of pull-out and tensile behaviours of FRP reinforcement for concrete. In: H, S., editors, E.M., editors. *Second International Conference on Composites in Infrastructure*. 1998.
13. Tastani, S.P., Pantazopoulou, S.J. Bond of GFRP bars in concrete: Experimental study and analytical interpretation. *Journal of Composites for Construction* 2006 ; 10(5) : 381–391.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕРНОГО БЕТОНА

<sup>1</sup>Т.В. Булай, <sup>2</sup>Д.М. Кузьменков, <sup>2</sup>Н.М. Шалухо

<sup>1</sup>Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск

email: best20.04@mail.ru, kuzmenkov@belstu.by, shalukho@belstu.by

*Описывается значимость серы как химического элемента, технологический процесс получения серного бетона. Авторами отмечены наиболее рациональные области применения серного бетона, положительные и отрицательные свойства исследуемого материала. Приведены экспериментальные данные по исследованию различных составов бетона на природной сере, а также прочностных характеристик серного бетона в зависимости от количества песка и максимальной крупности зерен заполнителя.*

*Ключевые слова: серный бетон, композиционный материал, модификация, кристаллизация, прочность.*

## INVESTIGATION OF PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES SULFUR CONCRETE

<sup>1</sup>T. Bulai, <sup>2</sup>D. Kuzmenkov, <sup>2</sup>N. Shalukho

<sup>1</sup>Grodno state university of a name Yanka Kupala, Belarus

<sup>2</sup>Belarus state technological university, Minsk

email: best20.04@mail.ru, kuzmenkov@belstu.by, shalukho@belstu.by

*The article describes the importance of sulfur as a chemical element, the process of obtaining sulfur concrete. The authors noted the most rational application of sulfur concrete, positive and negative properties of the studied material. Experimental data on the study of different compositions of concrete on natural sulfur are presented, as well as strength characteristics of sulfur concrete depending on the amount of sand and the maximum grain size of the filler.*

*Keywords: sulfuric concrete, composite materials, modification, crystallization, strength.*

Сера и ее соединения играют исключительную роль в природе и хозяйственной деятельности человека. Сера является весьма распространенным в природе химическим элементом и составляет 0,05% массы земной коры. Сера и ее соединения существуют в твердом, жидком и газообразном состоянии и она способна соединяться практически со всеми химическими элементами.

Атомы серы обладают уникальной способностью образовывать устойчивые гомоцепи, т.е. цепи, состоящие только из атомов S. Сера образует несколько десятков как кристаллических, так и аморфных модификаций, отличающихся составом молекул и полимерных цепей, способом их упаковки и некоторыми свойствами. Наиболее известны три аллотропных видоизменения серы: сера ромбическая, моноклинная, пластическая [1].

В настоящее время сера – один из важнейших видов сырья для многих химических производств. Удивительные особенности, не свойственные большинству других веществ, обусловили постоянный и все возрастающий интерес к этому минеральному вяжущему, при чем для него ищутся все новые области применения.

Серный бетон – композиционный материал, представляющий отформованную затвердевшую смесь, состоящую из минеральных наполнителей и заполнителей, серного вяжущего и различных модифицирующих добавок.

Серные композиции в зависимости от сочетания инертных заполнителей по размерам фракции могут быть изготовлены в виде бетонов, растворов и мастик. По средней плотности серные бетоны подразделяют на легкие, тяжелые и особо тяжелые. По структуре серные бетоны могут быть плотными и крупнопористыми. По цветовой гамме серные бетоны в зависимости от колера красителя могут обладать широким диапазоном цветовых фактур. Подвижность смеси серных бетонов в зависимости от расхода серного вяжущего могут быть литыми, подвижными, жесткими. [2]

Серные бетоны отличаются рядом положительных качеств, в сравнении с другими аналогичными материалами. К ним относят:

- период набора прочности, связанный только с периодом остывания и кристаллизацией серы;
- возможность вторичной переработки материалов, что позволяет организовать безотходное производство изделий;
- стойкость к воздействию агрессивных сред, особенно к действию солевой и кислотной агрессии;
- способность твердения смесей при достаточно низких температурах;
- за счет высокой скорости схватывания — быстрая оборачиваемость форм;
- низкая электро- и теплопроводность;
- водонепроницаемость;
- повышенная морозостойкость;
- высокая износостойкость.

Однако, несмотря на такие положительные характеристики, отдельные недостатки серного бетона могут отрицательно сказаться на широком его использовании:

- Высокая температура (140°C) для приготовления смесей.
- Высокая цена установки для выпуска изделий (10–12 млн).
- Высокая токсичность производства (выделение сероводорода).
- Низкая термостойкость (+90°C). [3]

Отличие технологий производств бетонов, связанных с применением цемента, от технологии производства серного бетона на использовании серного вяжущего, заключается в том, что при производстве серного бетона вместо цемента используется сера. Классическая технология серных бетонов и изделий из них предполагает разогрев серного компонента до температуры плавления (120-150°C) с последующим совмещением его с наполнителем и формование изделий необходимой формы. В качестве наполнителя может использоваться песок, щебень и др., в качестве серного вяжущего – сера, серосодержащие отходы и модификаторы. [4]

С целью оптимизации состава бетона, подбора наилучшей гранулометрии песка и исследования прочностных характеристик были проведены исследования, результаты которых представлены в таблице 1. Состав серного бетона варьировался соотношением сера:песок и максимальной крупностью зерен мелкого заполнителя. Испытания образцов на прочность проводились на следующий день после формования.

Таблица. – Влияние гранулометрического состава песка на прочность серного бетона

№ образца	Размер частиц песка, мм	Прочность, МПа на сжатие	Содержание песка в бетоне, %	Плотность бетона, г/см <sup>3</sup>
1	5,0	47,2	70	2,23
2	2,5	53,0	70	2,17
3	1,25	46,1	50	2,17
4	0,63	48,6	50	2,17
5	0,315	49,6	50	2,19
6	0,14 и менее	45,3	50	2,24

Как показывают результаты, приведенные в таблице, предел прочности на сжатие образцов из серного бетона может достигать 45-53 МПа уже следующий день после изготовления образцов. Серный бетон обладает уникальным свойством быстрого набора прочности, при чем он способен достигать высоких прочностных показателей даже на пылеватых песках, что для традиционных бетонов на портландцементном вяжущем невозможно.

Использование серы позволит получить высокоэффективные бетоны и изделия, которые во многих случаях не будут уступать бетонам на основе портландцементного вяжущего и найдут достаточно широкое применение не только в строительной практике, но и во многих других отраслях промышленности. Высокие прочностные свойства исследуемого материала, а также высокие химические свойства (эти выводы сделаны на основе опыта их применения в США, Канаде, Франции и Польше, а также в Японии и Южной Корее) могут рекомендовать его для изготовления тротуарных плит, бетонирования полов и площадок, подверженных воздействию кислот и солей, канализационных труб, коллекторных колец, минеральных и органических удобрений и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голубева, И.А. Проблемы производства и утилизации газовой серы в России, основные направления их решения / И.А. Голубева // Нефтегазохимия. –2017. – С. 22–27.
2. ПНСТ 105-2016. Смеси серобетонные и серобетон. Технические условия.
3. Волгушев, А.Н. Основные физико-механические свойства строительных композитов на основе термопластического серного вяжущего / А.Н. Волгушев // Бетон и железобетон. – 2007. – № 4. – С. 28–31.
4. Кузьменков, М.И. Серный бетон из отходов / М.И. Кузьменков // Строительство и архитектура. – 1991. – № 4. – С. 16–18.

УДК 691.327

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ «ВНУТРЕННЕГО УВЛАЖНЕНИЯ»

*В.В. Кравченко*

Брестский государственный технический университет, Беларусь

email: valvik@hotmail.com

*Представлены основные теоретические аспекты предлагаемой модели для прогнозирования объемной усадки и деформаций расширения цементных композитных систем в условиях «внутреннего увлажнения».*

*Ключевые слова: цементный камень, аутогенная усадка, внутреннее увлажнение, собственные деформации.*

## SIMULATION OF OWN DEFORMATIONS OF CEMENT COMPOSITE SYSTEMS UNDER THE CONDITIONS OF "INTERNAL MOISTURE"

*V. Kravchenko*

Brest state technical university, Belarus

email: valvik@hotmail.com

*The main theoretical aspects of the proposed model for predicting volumetric shrinkage and deformation of the expansion of cement composite systems under conditions of "internal moisture" are presented.*

*Keywords: cement stone, autogenous shrinkage, internal moistening, intrinsic deformations.*

Введение. Развитие технологии тяжелого бетона долгое время было направлено, главным образом, на получение его высокой прочности при сжатии. Выражением нового взгляда на свойства бетонов можно считать изменение в терминологии, когда повсеместно в зарубежной и национальной технической литературе начали применять термин «высокоэффективный бетон» (англ. high performance concrete). Термин «высокоэффективный бетон» явился следствием необходимости придания бетону специальных конструктивно-технологических свойств, которые, как правило, не учитывались при проектировании составов традиционных бетонов.

Высокоэффективные бетоны помимо высокой прочности при сжатии, характеризуются высокой долговечностью и связанными с ней свойствами проницаемости и плотности. Наряду с очевидными преимуществами, такие бетоны обладают существенными недостатками, основным из которых является развитие усадочных деформаций, главным образом, аутогенной усадки. Физическая (воздушная) и аутогенная усадка являются главными источниками появления микротрещин в структуре бетона, обусловленных возникновением собственных напряжений, в случае, когда усадочные деформации развиваются в условиях ограничения. Аутогенная усадка является неотъемлемым свойством бетона, наибольший эффект которой проявляется в изолированных условиях, когда бетон не теряет влагу в окружающую среду, которая обусловлена изменением начального объема композита в результате протекания химических реакций гидратации (химическая усадка), приводящих

к уменьшению относительной влажности в поровой среде цементного камня (т.н. «само-высыхание», англ. self-desiccation) [1].

Механизм аутогенной усадки. В настоящее время в исследовательском сообществе существует предположение о трех основных причинах, вызывающих деформацию аутогенной усадки в цементном камне [1]: (а) возникновение и развитие капиллярного давления в порах цементного камня, (б) изменение поверхностной энергии частиц твердой фазы цементного камня и (в) изменение расклинивающего давления адсорбированной воды, находящейся между частицами твердой фазы цементного камня.

Капиллярное давление  $p_c$ , действующее в поровой среде цементного камня может быть определено на основании закона Лапласа:

$$p_c = \frac{2 \cdot \gamma_{12} \cdot \cos \vartheta}{r_m}; \quad r_m = r_c - \delta_{ads}, \quad (1)$$

где  $\gamma_{12}$  – поверхностное натяжение воды на границе раздела фаз «жидкость – газ»;

$r_m$  – радиус мениска;

$\vartheta$  – краевой угол смачивания;

$r_c$  – радиус капилляра с мениском;

$\delta_{ads}$  – толщина слоя адсорбированной воды на поверхности капилляра.

Изменение толщины слоя воды, адсорбированной на поверхности стенок капилляра приводит к изменению поверхностной энергии частиц твердой фазы цементного камня. В работе [2] предложено учитывать изменение поверхностной энергии частиц твердой фазы цементного камня на границе раздела фаз «твердое тело – жидкость» и «твердое тело – газ» через дополнительное давление, возникающее в поровой среде цементного камня, которое в свою очередь зависит от капиллярного давления, действующего в его поровой среде:

$$p_U = \int_{S_{w,p}}^1 p_c \cdot dS, \quad (2)$$

где  $p_U$  – давление, возникающее в поровой среде при изменении поверхностной энергии частиц твердой фазы цементного камня;

$S_{w,p}$  – степень насыщения пор влагой.

Проявление расклинивающего давления в поровой среде цементного камня наблюдается там, где расстояние между поверхностями частиц твердой фазы меньше чем в два раза общей толщины слоя воды, адсорбированной на их поверхностях [1]. В работе [3] значение расклинивающего давления  $p_\pi$  в поровой среде цементного камня предложено оценивать по следующей зависимости:

$$p_\pi = p_{\pi,0} \cdot \exp \left[ -\frac{2 \cdot \delta_{ads}}{\lambda} \right], \quad (3)$$

где  $p_{\pi,0}$  – номинальное расклинивающее давление;

$\lambda$  – расстояние между частицами твердой фазы цементного камня, при котором проявляется наибольшее действие расклинивающего давления.

Как видно, представленные зависимости (1), (2) и (3) являются функциями двух основных аргументов – радиуса капилляра с мениском  $r_c$  и толщины слоя воды, адсорбированной на поверхности стенок капилляров  $\delta_{ads}$ . На основании положений классической теории термодинамики используя физические законы Рауля и Кельвина, можно получить уравнение для определения радиуса мениска:

$$\ln \left( \frac{RH}{a_w} \right) = - \frac{2 \cdot \gamma_{12} \cdot M_w}{r_m \cdot \rho_w \cdot R \cdot T}, \quad (4)$$

где  $RH$  – относительная влажность поровой среды цементного камня;  
 $a_w$  – активность воды в поровом растворе;  
 $M_w$  – молярная масса воды;  
 $\rho_w$  – плотность воды;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная;  
 $T$  – температура в поровой среде цементного камня.

Толщина слоя адсорбированной воды зависит от значения относительной влажности в поровой среде цементного камня. Толщина слоя адсорбированной воды может быть рассчитана на основе положений теории полимолекулярной адсорбции в зависимости от относительной влажности поровой среды, в соответствии с [4]:

$$\delta_{ads} = \frac{5,25 \cdot 10^{-9} \cdot RH}{\left( 1 - \frac{RH}{RH_{S_{w,p}=1}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{RH}{RH_{S_{w,p}=1}} + 15 \cdot RH \right)}, \quad (5)$$

где  $RH_{S_{w,p}=1}$  – относительная влажность, соответствующая полностью насыщенным влагой порам.

Из анализа зависимостей (1)-(5), можно сделать вывод о том, что основным фактором, оказывающим влияние на аутогенную усадку является значение относительной влажности в поровой среде цементного камня, уменьшение которой приводит к увеличению значения каждой ранее рассмотренной компоненты давления, действующего в поровой среде, что в свою очередь соответственно приводит к увеличению значения аутогенной усадки. Развитие химической усадки в цементном камне сопровождается постепенным уменьшением относительной влажности в его поровой структуре, которое принято называть «самовысыханием» (англ. – self-desiccation) [1].

**Концепция «внутреннего увлажнения».** В соответствии с терминологией ACI Committee 308 под «внутренним увлажнением» (англ. – internal curing) подразумевается процесс, при котором гидратация цемента происходит с участием дополнительной воды, доступной для реакций гидратации, но не являющейся частью воды затворения [5]. В рамках концепции «внутреннего увлажнения» требуемое количество дополнительной воды резервируется в специальном компоненте, который служит в качестве так называемого «увлажняющего агента». При изготовлении бетонной смеси «увлажняющий агент» распределяется в ее структуре, создавая таким образом внутренний источник воды, которая затем в процессе твердения бетона активно мигрирует в его поровую среду, заполняя водой образующиеся обезвоженные поры.

**Предпосылки и допущения многоуровневой модели цементного композита.** При разработке положений модели для прогнозирования собственных деформаций цементных



композитных систем приняты следующие предпосылки и не противоречащие им допущения:

1. Структура цементной композитной системы рассматривается на следующих элементарных гетерогенных уровнях: уровень 1 (уровень цементного камня), состоящий из твердой фазы, образованной продуктами гидратации, и капиллярной пористости, характерный размер фаз уровня выражается в мкм; уровень 2 (уровень цементной композитной матрицы), состоящий из цементного камня, транзитной зоны и гранул пористого заполнителя, характерный размер фаз уровня выражается в мм; уровень 3 (уровень бетонного композита), состоящий из композитной цементной матрицы, транзитной зоны и зерен плотного заполнителя, характерный размер фаз уровня выражается также в мм.

2. Цементная композитная система на каждом анализируемом является изотропной средой, развитие собственной деформации которой происходит равномерно во всех направлениях;

3. При моделировании собственных деформаций принимается, что цементная композитная система свободна от явлений, возникающих при приложении внешних воздействий.

4. Источником собственных деформаций в цементной композитной системе являются: (а) эффективное давление, действующее в ее поровой среде и (б) кристаллизационное давление этtringита, проявляющееся в процессе физико-химического расширения.

5. Источником внутреннего ограничения собственных деформаций цементной композитной системы является плотный заполнитель, формирующий жесткий каркас композита. Очевидно, что чем выше концентрация плотного заполнителя в цементной композитной системе и выше его жесткостные характеристики, тем больше степень ограничения, со стороны плотного заполнителя, развития свободных деформаций.

6. Развитие собственных деформаций цементной композитной системы при наличии ограничивающих связей (как внешних, так и внутренних) приводит к появлению в ней собственных, уравновешенных напряжений различного уровня.

7. В рамках предлагаемой модели развитие собственных деформаций рассматривается с учетом релаксации собственных напряжений в результате проявления упругой и пластической деформации.

8. При моделировании упругой и пластической деформации принято допущение, что пористый заполнитель, добавляемый в цементную композитную систему для предотвращения процесса «самовысыхания», не создает внутреннего ограничения, приводящего к возникновению собственных напряжений. Такое допущение обусловлено тем обстоятельством, что оптимальная концентрация пористого заполнителя, как правило, гораздо ниже, чем у плотного заполнителя. Вместе с тем, его влияние учитывается при моделировании собственных деформаций цементной композитной матрицы (уровень 2).

9. В данной работе собственные связанные деформации на уровне бетонного композита (уровень 3), в процессе его физико-химического расширения, определяют в условиях совместного действия внутреннего и внешнего ограничения, в виде цилиндрической оболочки, расположенной вокруг ядра композита.

**Моделирование собственных деформаций цементного камня (уровень 1).** В общем случае собственная деформация цементного камня  $\varepsilon_{kk}^{cm}$  является результатом совместного развития свободной деформации усадки  $\varepsilon_{kk}^{cm,shr}$ , физико-химического  $\varepsilon_{kk}^{cm,ext}$  и температурно-

го расширения  $\varepsilon_{kk}^{cm, id}$ , значение которой может быть определено из принципа суперпозиции. Учитывая вязкоупругие свойства цементного геля, обусловленные его структурой, свободная деформация усадки цементного камня включает упругую и пластическую составляющую [6]:

$$\varepsilon_{kk}^{cm, e} + \varepsilon_{kk}^{cm, pl} = \int_{\tau_0}^{\tau} 3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_{cm}^{ve}(\tau, \tau')) \cdot J_{cm}(\tau, \tau') \cdot \frac{d\sigma_0^{cm}(\tau')}{d\tau'} \cdot d\tau'; \quad (6)$$

где  $\sigma_0^{cm}(\tau')$  – нормальное среднее напряжение в цементном камне в момент времени  $\tau'$ ;  $J_{cm}(\tau, \tau')$  – мера ползучести цементного камня в момент времени  $\tau$ , от действия постоянного уровня напряжений в момент времени  $\tau'$ ;

$\nu_{cm}^{ve}(\tau, \tau')$  – коэффициент Пуассона цементной матрицы, обусловленный ее вязкоупругими свойствами, в момент времени  $\tau$ , от действия постоянного уровня напряжений в момент времени  $\tau'$ ;

$[\tau_0, \tau]$  – рассматриваемый временной интервал.

Среднее нормальное напряжение в цементном камне основываясь на принятых предположениях и допущениях, определяют из условия равновесия при действии внутренних сил:

$$\sigma_0^{cm} = p_e \cdot \frac{\phi_c}{1 - \phi_c}, \quad (7)$$

где  $\phi_c$  – относительный объем капиллярной пористости в цементной матрице;

$p_e$  – эффективное давление, действующее в поровой среде цементного камня, определяемое из принципа суперпозиции всех компонент давления, действующих в его поровой среде:

$$p_e = -S_{w, p} \cdot p_c + p_U + p_\pi \cdot f_\pi, \quad (8)$$

где  $f_\pi$  – объемная доля капиллярной пористости, размер пор которой равен двойному значению толщины слоя воды, адсорбированной на их поверхности.

Деформация физико-химического расширения цементного камня в результате топомехимической реакции может быть определена на основе геометрической модели, в которой эффективное сферическое включение этtringита в единичной концентрации помещено в эффективную среду цементного камня. Эффективное сферическое включение этtringита состоит из сферической частицы клинкерного минерала С<sub>3</sub>А, вокруг которой располагается оболочка этtringита. Свободную деформацию цементного камня в процессе расширения этtringита, исходя из рассмотренной геометрической модели, определяют по следующей зависимости [7]:

$$\varepsilon_{kk}^{cm, ext} = \left( \frac{3 \cdot K_p^{Aft} + 4 \cdot G_{cm, d}}{3 \cdot K_{cm, d} + 4 \cdot G_{cm, d}} \right) \cdot \varepsilon_{kk}^{Aft}, \quad (9)$$

где  $K_p^{Aft}$  – эффективный модуль объемных деформаций сферического включения этtringита;

$K_{cm, d}$  и  $G_{cm, d}$  – эффективный объемный модуль и модуль сдвига цементного камня в ненасыщенном состоянии;

$\varepsilon_{kk}^{Aft}$  – относительная объемная деформация расширения сферического включения этtringита, определяемая по следующей зависимости:

$$\varepsilon_{kk}^{Aft} = k_v \cdot \left(1 - \left(1 - \alpha_{cl, C_3A}\right)^3\right) \cdot f_{Aft}, \quad (10)$$

где  $k_v$  – коэффициент увеличения объема этtringита при полной гидратации клинкерного минерала  $C_3A$ ;

$\alpha_{cl, C_3A}$  – степень гидратации клинкерного минерала  $C_3A$ ;

$f_{Aft}$  – объемная доля сферического включения этtringита в цементном камне, принимаемая равной начальному относительному объему клинкерного минерала  $C_3A$ .

Относительную деформацию температурного расширения цементного камня определяют по следующей зависимости:

$$\varepsilon_{kk}^{cm, td} = 3 \cdot \alpha_{cm} \cdot (T - T_0), \quad (11)$$

где  $\alpha_c$  – коэффициент линейного температурного расширения цементного камня;

$T$  и  $T_0$  – соответственно фактическая и базовая температура среды.

**Моделирование собственной деформации цементной композитной матрицы (уровень 2).** Для прогнозирования собственных деформаций цементной композитной матрицы использована трехфазная модель композитной системы, состоящей из сферического включения, матрицы определенной толщины, в форме сферической оболочки, располагаемой вокруг включения и эффективной среды, при следующих допущениях: (а) контакты на границах раздела фаз, в процессе развития собственных деформаций, не разрушаются; (б) жесткостные характеристики цементной композитной системы остаются постоянными (неизменными) в процессе деформирования, независимо от появления в ней микротрещин и (в) заполнитель и транзитная зона, вокруг него, являются пассивными фазами, собственные деформации в которых отсутствуют.

Основываясь на ранее приведенных предпосылках к моделированию собственных деформаций и вышеуказанных допущениях, для трехфазной модели, включающей эффективное сферическое включение из пористого заполнителя и транзитной зоны, сферическую оболочку цементной матрицы, определенной толщины вокруг него, и эффективную среду, свободную собственную деформацию определяют по следующей зависимости [8]:

$$\varepsilon_{kk}^{cmc} = \frac{K_{cm} \cdot \varepsilon_{kk}^{cm} \cdot (1 - c_{inc}^{cmc}) \cdot (3 \cdot K_{inc}^{cmc} + 4 \cdot G_{cm})}{K_{cm} \cdot (3 \cdot K_{inc}^{cmc} + 4 \cdot G_{cm}) - 4 \cdot c_{inc}^{cmc} \cdot G_{cm} \cdot (K_{cm} - K_{inc}^{cmc})}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon_{kk}^{cmc}$  – свободная относительная объемная деформация цементной композитной матрицы;

$K_{inc}^{cmc}$  – объемный модуль эффективного включения, состоящего из пористого заполнителя и транзитной зоны;

$c_{inc}^{cmc}$  – объемная концентрация эффективного включения, состоящего из пористого заполнителя и транзитной зоны, в цементной композитной матрице.

**Моделирование собственной деформации бетонного композита (уровень 3).** Оценивая собственную деформацию бетонного композита, в котором плотный заполнитель формируя жесткий каркас ограничивает свободную собственную деформацию цементной композитной матрицы, следует говорить о его связанной собственной деформации, значение которой в общем случае определяют следующей алгебраической суммой:

$$\varepsilon_{rr}^c = \varepsilon_{rr}^{cmc} + \varepsilon_{rr}^{c,e} + \varepsilon_{rr}^{c,pl}, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_{rr}^c$  – относительная связанная деформация бетонного композита в радиальном направлении;

$\varepsilon_{rr}^{cmc}$  – относительная свободная деформация цементной композитной матрицы в радиальном направлении;

$\varepsilon_{rr}^{c,e}$  и  $\varepsilon_{rr}^{c,pl}$  – соответственно относительная упругая и пластическая деформация бетонного композита в радиальном направлении.

Для определения относительной упругой и пластической деформации бетонного композита используют дискретный метод, основанный на методе трапеций численного интегрирования. В соответствии с данным методом в каждом  $i$ -ом временном интервале, принадлежащим диапазону  $[1, n]$ , определяют соответствующее приращение упругой и пластической деформации [9]:

$$(\Delta \varepsilon_{rr}^{c,e})_i + (\Delta \varepsilon_{rr}^{c,pl})_i = J_c(\tau_i, \tau_{i-1/2}) \cdot (\Delta \sigma_{rr}^c)_i + \sum_{j=1}^{i-1} (J_c(\tau_i, \tau_{j-1/2}) - J_c(\tau_{i-1}, \tau_{j-1/2})) \cdot (\Delta \sigma_{rr}^c)_j, \quad (14)$$

где  $J_c(\tau_i, \tau_{i-1/2})$  – мера ползучести бетонного композита в момент времени  $\tau_i$ , от действия постоянного уровня напряжений в момент времени  $\tau_{i-1/2}$ ;

$\tau_{i-1/2}$  – момент времени, соответствующий середине  $i$ -го временного интервала.

Собственные напряжения в бетонном композите в  $i$ -ом временном интервале для случая внутреннего ограничения определяют исходя из его собственной связанной деформации и собственной свободной деформации цементной композитной матрицы, в случае внешнего ограничения через реакцию в ограничивающей связи, по следующим уравнениям:

$$(\Delta \varepsilon_{rr}^c)_{ir} = (\Delta \varepsilon_{rr}^{cmc})_i - J_c(\tau_i, \tau_{i-1/2}) \cdot (\Delta \sigma_{rr}^c)_{ir} - \sum_{j=1}^{i-1} [J_c(\tau_i, \tau_{j-1/2}) - J_c(\tau_{i-1}, \tau_{j-1/2})] \cdot (\Delta \sigma_{rr}^c)_j; \quad (15)$$

$$(\Delta \sigma_{rr}^c)_{ir} = \frac{\delta_{con}}{R_c} \cdot E_{con} \cdot (\Delta \varepsilon_{rr}^c)_{ir}, \quad (16)$$

где  $(\Delta \varepsilon_{rr}^c)_{ir}$  и  $(\Delta \varepsilon_{rr}^c)_{or}$  – соответственно приращение относительной связанной деформации бетонного композита в радиальном направлении в  $i$ -ом временном интервале, в условиях внутреннего и внешнего ограничения;

$(\Delta \sigma_{rr}^c)_{ir}$  и  $(\Delta \sigma_{rr}^c)_{or}$  – соответственно приращение радиального напряжения в бетонном композите в  $i$ -ом временном интервале, в условиях внутреннего и внешнего ограничения;

$(\Delta \varepsilon_{rr}^{cmc})_i$  – приращение относительной свободной деформации цементной композитной матрицы в радиальном направлении в  $i$ -ом временном интервале;

$R_c$  – радиус ядра бетонного композита;

$\delta_{con}$  – толщина внешней цилиндрической оболочки;

$E_{con}$  – модуль упругости материала внешней цилиндрической оболочки при растяжении.

Связанную собственную деформацию бетонного композита в радиальном направлении в условиях внутреннего и внешнего ограничения, определяют как алгебраическую сумму приращений собственной деформации по всем временным интервалам  $[1, n]$ , учитывая при этом упругую радиальную деформацию, обусловленную действием результирующей

щего поля напряжений бетонного композита, от суммарной реакции в ограничивающих связях, к началу  $n$ -ого временного интервала:

$$\begin{cases} \varepsilon_{rr}^{c,ir} = \sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_{rr}^c)^{ir}_i - \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (\Delta \sigma_{rr}^c)^j_{ir}}{E_c(\tau_{n-1})} \\ \varepsilon_{rr}^{c,or} = \sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_{rr}^c)^{or}_i - \frac{\sum_{j=1}^{n-1} [(\Delta \sigma_{rr}^c)^j_{or} + (\Delta \sigma_{rr}^c)^j_{ir}]}{E_c(\tau_{n-1})} \end{cases}, \quad (17)$$

где  $\varepsilon_{rr}^{c,or}$  – относительная связанная деформация бетонного композита в радиальном направлении в условиях внешнего ограничения.

Согласно теории солидификации структура бетонного композита в произвольный момент времени может быть представлена как совокупность зерен заполнителя и расположенных вокруг них определенного количества элементарных кластеров (слоев) твердой фазы цементного камня, образованных к рассматриваемому моменту времени. Каждый образованный кластер твердой фазы цементного камня можно рассматривать как отдельную внутреннюю связь бетонного композита, препятствующую развитию его деформаций. Рассматривая образование структуры бетонного композита по теории солидификации в контексте дискретного метода, следует, что в  $i$ -ом временном интервале, за счет приращения твердой фазы цементного камня, образуется  $k$ -ая внутренняя связь бетонного композита, где  $k \in [1, m]$  и  $m = n$  (рис. 1).

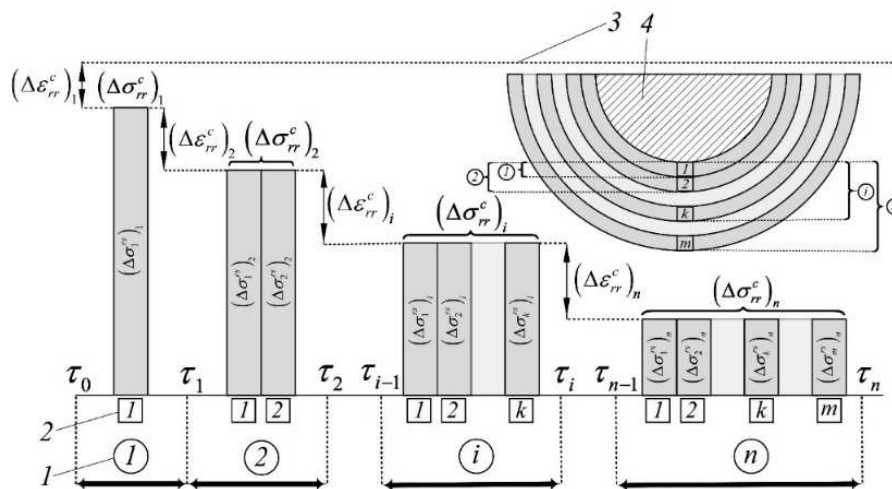


Рисунок 1. – Схема образования внутренних связей в бетонном композите, на основе портландцемента, в процессе твердения, согласно теории солидификации:

1 – временные интервалы; 2 – внутренние связи в бетонном композите; 3 – граница начального состояния бетонного композита; 4 – зерно заполнителя

Если в произвольный момент времени накопленный потенциал напряжений в отдельной связи бетонного композита превысит предельное значение, связь разрушится и ее жесткость станет равной нулю, соответственно общая жесткость бетонного композита уменьшится на величину жесткости разрушенной связи. Поэтому определять связанную деформацию бетонного композита в радиальном направлении в условиях внутреннего и внешнего ограничения, необходимо учитывая возможное разрушение внутренних связей

бетонного композита, принимая во внимание условие их разрушения. Условие разрушения отдельной связи можно представить в следующем виде:

$$\sum_{j=i}^n (\Delta \sigma_k^r)_j > \sigma_k^{tr}, \quad (18)$$

где  $(\Delta \sigma_k^r)_j$  – приращение радиального напряжения в  $k$ -ой связи бетонного композита в  $j$ -ом временном интервале;  $\sigma_k^{tr}$  – предельное напряжение  $k$ -ой связи бетонного композита, при которой происходит ее разрушение.

**Верификация предлагаемой модели.** Верификация предложенной модели для определения собственных деформаций бетонного композита выполнена путем сравнения рассчитанных значений относительных собственных деформаций и опытных данных полученных в работах [10-14] и собственных исследованиях (рис. 2).

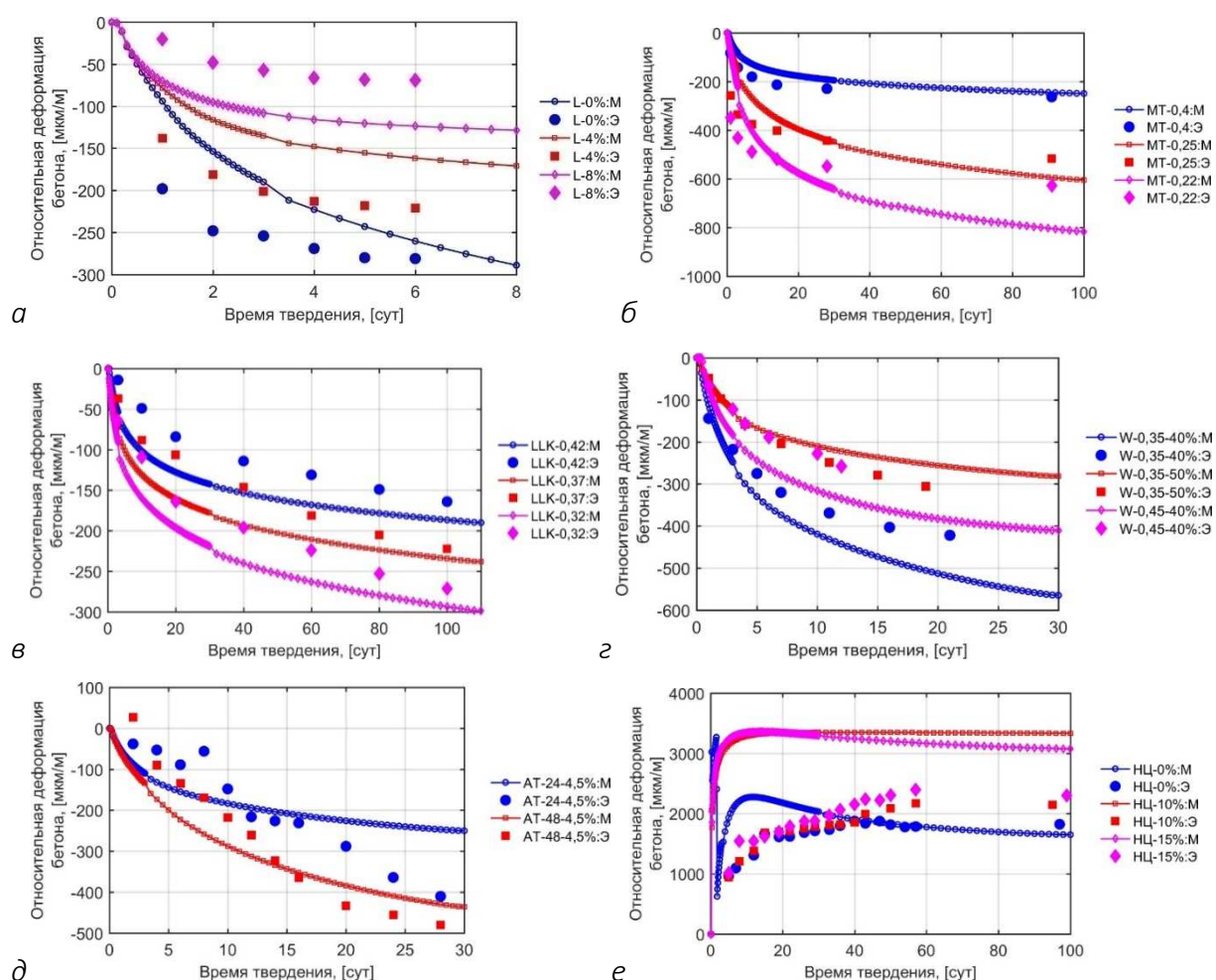


Рисунок 2. – Изменение относительной деформации бетона в процессе твердения по данным [10] (а), [11] (б), [12] (в), [13] (г), [14] (д) и собственных исследований (е):

М – результаты, полученные по предлагаемой модели; Э – экспериментальные данные

**Заключение.** Предложена расчетная модель, позволяющая прогнозировать относительные деформации усадки и физико-химического расширения цементных композитных систем при низких водовяжущих отношениях, содержащих предварительно насыщенный пористый заполнитель в условиях «внутреннего увлажнения».

Для проверки достоверности прогнозируемых значений собственных деформаций цементных композитных систем, полученных по предлагаемой расчетной модели, была выполнена ее верификация на основе различных экспериментальных данных. Прогнозируемые и экспериментальные значения собственных деформаций показали удовлетворительную согласованность, подтверждающие справедливость принятых положений в рамках предлагаемой модели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lura, P. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms / P. Lura, O.M. Jensen, K. Van Breugel // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33, iss. 2. – P. 223–232.
2. Coussy, O. The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials / O. Coussy, P. Dangla, T. Lassabatère, V. Baroghel-Bouny // *Materials and Structures*. – 2004. – Vol. 37, iss. 1. – P. 15–20.
3. Maruyama, I. Origin of Drying Shrinkage of Hardened Cement Paste: Hydration Pressure / I. Maruyama // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2010. – Vol. 8, iss. 2. – P. 187–200.
4. Hillerborg, A. A modified absorption theory / A. Hillerborg // *Cement and Concrete Research*. – 1985. – Vol. 15, iss. 5. – P. 809–816.
5. Report on Internally Cured Concrete Using Prewetted Absorptive Light-weight Aggregate: ACI Committee 308/ American Concrete Institute. – ACI, 2013. – 12 P. – ACI (308-213) R-13.
6. Hua, C. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. I. Modelling at macroscopic scale / C. Hua, P. Acker, A. Ehrlicher // *Cement and Concrete Research*. – 1995. – Vol. 25, iss. 7. – P. 1457–1468.
7. Aboudi, J. Mechanics of Composite Materials. A Generalized Multiscale Analysis Approach / J. Aboudi, S.M. Arnold, B.A. Bednarczyk. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. – 984 p.
8. Xi, Y. Shrinkage of cement paste and concrete modelled by a multiscale effective homogeneous theory / Y. Xi, H.M. Jennings // *Materials and Structures*. – 1997. – Vol. 30. – P. 329–339.
9. Bazant, Z.P. Comparison of Approximate Linear Methods for Concrete Creep / Z.P. Bazant, L.J. Najjar // *Journal of the Structural Division*. – 1973. – Vol. 99, iss. 9. – P. 1851–1874.
10. Lura, P. Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete / P. Lura. – Delft: Delft University Press, 2003. – 180 p.
11. Tazawa, E. Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials / E. Tazawa, S. Miyazawa // *Magazine of Concrete Research*. – 1997. – Vol. 49, iss. 178. – P. 1–22.
12. Lee, K.M. Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag / K.M. Lee, H.K. Lee, S.H. Lee, G.Y. Kim // *Cement and Concrete Research*. – 2006. – Vol. 36, iss. 7. – P. 1279–1285.
13. Wei, Y. Modeling of autogenous deformation in cementitious materials, restraining effect from aggregate, and moisture warping in slabs on grade: diss. ... Doctor of Philosophy / Y. Wei. – University of Michigan, 2008. – 160 p.
14. Akcay, B. Optimization of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concrete / B. Akcay, M.A. Tasdemir // *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23, iss. 1. – P. 353–363.

## К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ СКОРОСТИ НАБОРА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПЕНОБЕТОНОМ

А.А. Драгель

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.dragel@psu.by

*Рассмотрены основные добавки, применяемые для ускорения набора пластической прочности пенобетоном. Приведены принцип действия, область применения, дозировка и основные физико-химические свойства данных добавок. Рассмотрена методика определения пластической вязкости, предложенная С.Я. Вейлером, основанная на выдерживании рифлёных пластинок из пенобетонной смеси.*

*Ключевые слова: пенобетон, добавки ускорители твердения, пластическая прочность пенобетонной смеси.*

## TO THE QUESTION OF ACCELERATING THE SPEED OF THE FOAM CONCRETE PLASTIC STRENGENING

A. Dragel

Polotsk state university, Belarus

email: a.dragel@psu.by

*The article considers the main additives used to accelerate foam concrete plastic strength set. The principle of action, the scope of application, dosage and the main physicochemical properties of these additives are given. The technique for determining the plastic viscosity, proposed by S. Weyler, based on pulling corrugated plates from a foam concrete mixture, is considered.*

*Keywords: foam concrete, hardening accelerating additives, plastic strength of foam concrete mixture.*

При изготовлении бетонных изделий после перемешивания компонентов и уплотнения смеси в результате физико-химического взаимодействия частиц цемента с водой в течение длительного времени наблюдаются объёмные изменения бетона – расширение или усадка. Этими явлениями стремятся управлять в зависимости от требуемых свойств конечной продукции путём введения добавок.

Технология изготовления пенобетона постоянно совершенствуется, вносятся предложения по использованию новых и эффективных добавок, модернизации технологических процессов, что позволяет повысить уровень и стабильность качества стенового материала. Основная идея исследований заключается в поиске эффективных добавок и способов их введения для модификации пенобетонной смеси с целью уменьшения усадочных деформаций и повышения прочности, водостойкости, паропроницаемости пенобетона, а так же для повышения теплозащиты и трещиностойкости ограждающих пенобетонных конструкций.

При выборе цемента для пенобетона, прежде всего надо обратить внимание на те качества, которые сокращают сроки схватывания цементного теста. Чем быстрее схватится



пенобетон в форме – тем качественней получится его структура. По некоторым технологиям пенобетона смесь находится в формах по двое-трое суток, но схватываться она должна максимально быстро. Главное – быстрое схватывание цемента обеспечивает качественную структуру пенобетона. Объясняется это следующим образом: пористость пенобетону придаёт пенообразователь, стабильность пены – не безгранична, очень хороший пенообразователь сможет выдержать бетонную массу всего лишь несколько часов, затем наступает разрушение пузырьков воздуха и проседание (усадка) пенобетона[1].

Сроки схватывания цемента обозначают время, за которое твердение цементного теста переходит из коагуляционной в кристаллическую фазу и фактор этот не зависит от технологии пенобетона. Коагуляционные процессы начинаются с момента затворения цемента водой и переходят в кристаллизацию по окончании сроков схватывания. Во время коагуляции цемент можно замешивать, транспортировать в формы, разравнивать без ущерба для будущего качества бетона – во время кристаллизации, любое механическое воздействие на цементное тесто приводит к невозвратному разрушению ещё слабой, не набравшей прочности, структуры бетона. Особенно пагубно сказывается нарушение кристаллизационной структуры на прочность цементного камня при производстве пенобетона по любой из технологий. Если пенообразователь уже не может удерживать на своих пузырьках цементную массу, а раствор ещё не схватился и не в состоянии держать отформованный объём самостоятельно, происходит проседание и разрушение кристаллизационной структуры пенобетона.

Эффект применения ускорителей твердения бетона заключается в активации процессов гидратации цемента. Результатом энергичных реакций обмена, вызванных применением ускорителей схватывания, является активное выделение свободной извести и повышение растворимости силикатных составляющих цемента. Увеличение скорости коагуляции коллоидного раствора, посредством применения ускорителей схватывания, приводит к стремительному сближению частиц гидратных новообразований и зёрен цемента [3].

Характер воздействия разных добавок-ускорителей на цементное тесто неодинаков, это даёт возможность достижения необходимого эффекта именно в данном конкретном случае применения бетонного раствора.

Для определения эффективности влияния добавок-ускорителей на кинетику набора пластической прочности используется метод выдергивания пластины, разработанный С.Я. Вейлером. Его сущность заключается в определении усилия, необходимого для сдвига рифленной пластинки, погруженной в исследуемую систему [2].

Прибор для определения пластической прочности пенобетонной смеси состоит из лабораторных равноплечих весов, на одном конце коромысла которых подвешена градуированная емкость с водой, на втором – рифленная пластинка размером 2х3 см, которая опускается в испытываемую смесь. Схема прибора приведена на рисунке 1.

Для проведения эксперимента изготавливают пенобетонную смесь и заполняют ею одинаковые мерные емкости (пластиковые стаканчики). В каждую из проб исследуемой смеси погружают рифленную пластинку на одинаковую глубину. Количество проб должно соответствовать количеству временных интервалов, по истечению которых будет определяться пластическая прочность. Испытания проводят через час с момента изготовления смеси и далее с таким же интервалом до тех пор, пока рифленная пластина не перестанет выдергиваться из смеси.

Пластическую прочность, г/см<sup>2</sup> ( $P_m \times 10^{-1}$ ), выраженную предельным напряжением сдвига, определяют по формуле

$$P_m = \frac{F}{2 \cdot S}, \quad (1)$$

где  $F$  – величина нагрузки, необходимая для сдвига пластины, погруженной на одну и ту же глубину исследуемой массы, и численно равная весу воды в емкости 2, г;  
 $S$  – площадь пластинки, см<sup>2</sup>.

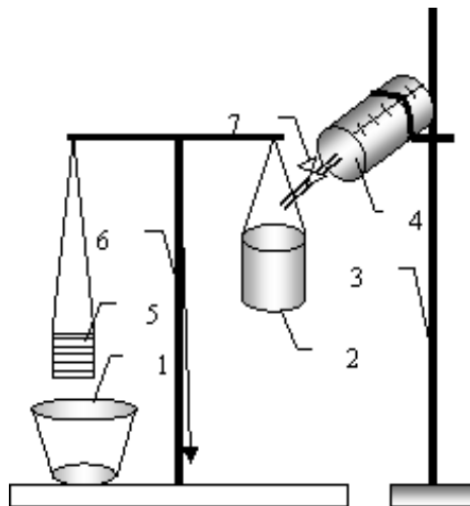


Рисунок 1. - Установка для опыта:

1 – мерная емкость для смеси; 2 – емкость; 3 – штатив; 4 – градуированная емкость с водой; 5 – рифленая пластинка; 6 – лабораторные весы; 7 – винт

Таким образом, в данной работе рассмотрены современные добавки-ускорители твердения пенобетона. Приведены их принципы действия, область применения, физико-механические свойства. Для дальнейших исследований по данной тематике будет использован метод С.Я. Вейлера, основанный на выдёргивании рифлёной пластины.

Формование образцов и исследование их физико-механических характеристик проводилось с использованием сырьевой смеси, содержащей 332 г цемента, 116 мл воды, 120 мл водного раствора пенообразователя FOAMCEM, рабочей концентрации 3%. Количество вводимых в смесь добавок-ускорителей составило 2 процента от массы вяжущего(6,7 г).

В ходе исследования изготавливалось по 4 образца с пенобетоном на каждую добавку. В каждый образец погружалась пластинка, а затем с интервалов в 1 час с момента приготовления пенобетонной смеси выдергивалась из пенобетонной смеси. Данные по нагрузке необходимой для выдергивания пластин, а также плотность пенобетона представлены в таблице 1.

Графически данные таблицы представлены на гистограмме (рис. 2).

Полученные данные свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на кинетику набора пластической прочности пенобетона имеет гидрокарбонат натрия, но использование данной добавки нарушает ячеистую структуру пенобетонной смеси (рис. 3) и на поверхности образцов присутствует большое количество открытых пор. Образцы 2–5 имеют значительные усадки, и как следствие деформационные трещины и повышенную плотность.

Таблица 1. – Влияние добавок-ускорителей на плотность и пластическую прочность пенобетона

№ добавки	Добавка	Выдерживающее усилие с интервалом в 1 ч с момента изготовления пенобетонной смеси, грамм.				Плотность, кг/м <sup>3</sup>
		0	1	2	3	
1	Хлорид железа	14	25	34	48	305
2	Борно-магниевое	8	20	25	31	355
3	Марганец сернокислый	9	24	30	35	360
4	Без добавки	10	18	30	38	335
5	Калий сернокислый	18	28	35	38	330
6	Магний сернокислый	18	25	36	47	310
7	Кальциевая селитра	18	34	48	58	305
8	Железный купорос	18	30	44	50	320
9	Гидрокарбонат натрия	17	35	55	90	340

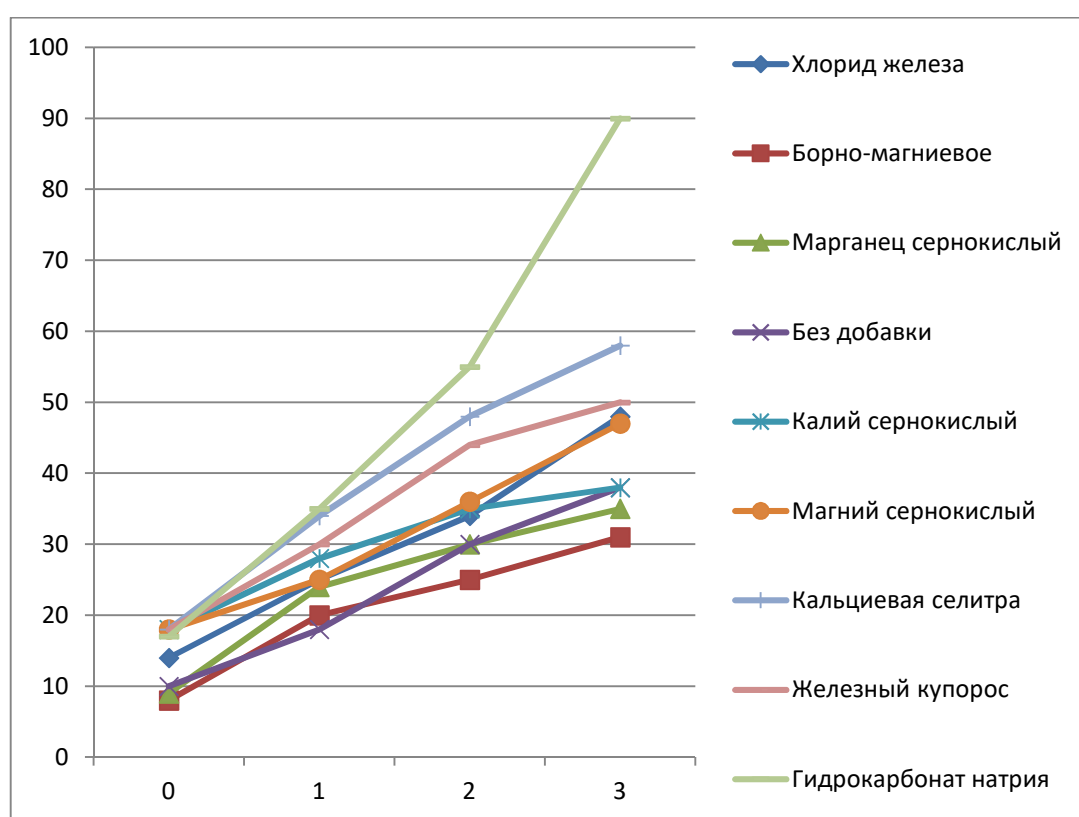


Рисунок 2. – Влияние добавок на кинетику набора пластической прочности пенобетоном



Рисунок 3. – Образцы пенобетонной смеси с добавками (расположены в соответствии с нумерацией добавок слева направо, сверху вниз)

Таким образом наиболее оптимальными добавками являются добавки номер 1, 6, 7, 8 (хлорид железа, магний сернокислый, кальциевая селитра и железный купорос соответственно). Использование данных добавок позволяет увеличить пластическую прочность пенобетонной смеси по сравнению с бездобавочной смесью (образцы №4) к концу третьего часа в среднем на 35%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Портник, А.А., Все о пенобетоне / А.А. Портник, С.Р. Ружинский, А.В.Савиных. – СПб., 2003. – 224 с.
2. Исследование свойств пенобетонных смесей [Электронный ресурс] // Сборник научных трудов студентов России. – Режим доступа: <http://www.cs-alternativa.ru/text/2114>. – Дата доступа: 24.03.2018.
3. Состав и материалы для производства пенобетона [Электронный ресурс] // Стройбетон. – Режим доступа: <http://www.ibeton.ru/othermaterials1.php>. – Дата доступа: 04.06.2017.
4. Добавки для производства пенобетона [Электронный ресурс] // Стройбетон. – Режим доступа: <http://www.ibeton.ru/a52.php>. – Дата доступа: 17.03.2018.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЩЕЛОЧНОГО АКТИВАТОРА ДЛЯ ГЕОПОЛИМЕРНОГО ВЯЖУЩЕГО

Л.М. Парфёнова, Е.А. Разуева, М.Н. Высоцкая

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: l.parfenova@psu.by, m.vysotskaya@psu.by, e.razueva@psu.by

*Рассматривается одно из направлений энерго- и ресурсосбережения в строительной отрасли. Предложено использование золошлаковой смеси БелГРЭС г.п.Ореховск в качестве сырья для производства геополимерного вяжущего. Приведена краткая характеристика физико-механических свойств золы, а также химический состав золошлаковой смеси. Выполнены исследования по оптимизации концентрации щелочного активатора гидроксида натрия (NaOH) для геополимерного вяжущего. Найден оптимальный состав геополимерного вяжущего с применением метода математического планирования эксперимента на основе трехфакторного плана второго порядка. Построена зависимость прочности от водозольного отношения и концентрации щелочного активатора. Установлена оптимальная концентрация гидроксида натрия при водозольном отношении  $W/Z=0,3$ .*

*Ключевые слова: геополимер, отвальная золошлаковая смесь, гидроксид натрия, щелочная активация, химический состав, вяжущее.*

## OPTIMIZATION OF ALKALINE ACTIVATOR CONCENTRATION FOR GEOPOLYMER BINDER

L. Parfenova, K. Razueva, M. Vysotskaya

Polotsk State University, Belarus

email: l.parfenova@psu.by, m.vysotskaya@psu.by, e.razueva@psu.by

*The article considers one of the directions of energy and resource saving in the construction industry. The use of ash-and-slag mixture of the Belorusskaya state district power station of the urban settlement Orekhovsk as a raw material for the production of geopolymer binder is proposed. A brief description of the physical and mechanical properties of ash and the chemical composition of the ash-and-slag mixture are given. Studies were carried out to optimize the concentration of the alkaline sodium hydroxide activator (NaOH) for the geopolymer binder. The optimal composition of the geopolymer binder with the application of the method of mathematical design of the experiment based on a three-factorial plan of the second order is found. The dependence of the strength on the water-ash ratio and the concentration of the alkaline activator is constructed. The optimum concentration of sodium hydroxide is established at a water-ash ratio  $W/A = 0.3$ .*

*Keywords: geopolymer, ash-and-slag mixture, sodium hydroxide, alkaline activation, chemical composition, binder.*

**Введение.** Для Республики Беларусь разработка энерго- и ресурсосберегающих материалов и технологий является одним из приоритетных направлений развития строительной отрасли. Количество ежегодно публикуемых научно-исследовательских работ, связан-

ных с новой разновидностью безобжиговых вяжущих – геополимерных, и опыт практического использования строительных материалов на их основе, позволяет сделать вывод о высоком интересе к этому виду вяжущих во всем мире и о перспективности развития данного направления ресурсосберегающих технологий в строительной индустрии.

Экономические и экологические факторы побуждают исследователей к поиску альтернативы портландскому цементу. При производстве цемента требуется значительное количество энергии (от 750 до 1450°C для производства клинкера) и выделяется большой объем CO<sub>2</sub> в атмосферу. Производство цемента в 2016 году составило около 5% мирового выброса CO<sub>2</sub> [1]. В качестве сырья для производства геополимеров могут использоваться отходы и побочные продукты промышленности золы-уноса, металлургические (доменные) шлаки, золы рисовой шелухи. По сравнению с производством цемента при производстве геополимерных вяжущих сокращается на 70-90 % расход энергии и выбросы углекислого газа [2].

Под геополимерами принято подразумевать вяжущие системы на основе тонкодисперсных аморфных или кристаллических алюмосиликатных материалов, затворяемых растворами щелочей или солей, имеющими щелочную реакцию (обычно растворами гидроксидов, силикатов или алюминатов натрия и калия) [3]. Отмечается [4], перспективность использования в качестве основного компонента геополимерного вяжущего низкокальциевых зол-уноса с высоким содержанием оксидов кремния и алюминия. По сравнению с другими сырьевыми материалами в их составе содержится значительная доля стекловидных фаз алюмосиликатного состава, которые в совокупности с высокой дисперсностью позволяют получать геополимеры с высокими техническими характеристиками [5].

**Материалы и методы исследования.** Для проведения экспериментальных исследований использовалась золошлаковая смесь, образующаяся на Белорусской ГРЭС г.п. Ореховск Витебской области при сжигании топливной смеси из 50% древесной щепы и 50 % торфа. Химический состав золошлаковой смеси (мас.%) по ГОСТ 10538-87 представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав золошлаковой смеси Белорусской ГРЭС (мас. %)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	ппп
87.62	4.39	1.08	3.08	0.55	0.61	1.79	0.24	0.19	<0.10	0.07

По химическому составу золошлаковая смесь состоит в основном из оксидов кремния и алюминия (более 90%). По модулю основности золошлаковая смесь относится к кислым, содержание оксида кальция составляет около 3%.

Золошлаковую смесь высушивали при температуре 120°C. В экспериментах использовалась фракция, прошедшая через сито № 008, т.е. по ГОСТ 25818 – зола-уноса (далее зола) со следующими характеристиками: насыпная плотность 960 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность 2100 кг/м<sup>3</sup>.

В качестве щелочного активатора использовался гидроксид натрия (NaOH) СТО 00203275-206-2007. Для приготовления раствора щелочи гранулы гидроксида натрия растворяли в воде и давали остыть раствору до температуры 20°C. Геополимерное вяжущее получали путем смешивания золы со щелочным раствором в течение 45 минут. Из полученной пластичной массы формовали образцы кубиков с размером ребра 20 мм. Образцы без предварительной выдержки помещали в сушильный шкаф SNOL, где они

твердели в течение 24 часов при температуре 60°C. Прочность образцов на сжатие определяли через 24 часа после температурной обработки.

**Основная часть.** Оптимизация концентрации щелочного активатора выполнялась с применением метода математического планирования эксперимента на основе трехфакторного плана второго порядка. В качестве варьируемых факторов рассматривались массовая доля золы в составе геополимерного вяжущего (x1), массовая доля гидроксида натрия NaOH (x2) и водозольное отношение (x3), в качестве результирующего фактора – прочность на сжатие геополимерного камня (Rсж).

Таблица 3. – Уровни и интервалы варьирования факторов

Код	Значение кода	Значение факторов		
		x1	x2	x3
Основной уровень	0	0,8	0,14	0,259
Интервал варьирования	Δ	0,2	0,05	0,091
Верхний уровень	+	1	0,19	0,35
Нижний уровень	-	0,6	0,09	0,169

Матрица планирования эксперимента в кодированных и натуральных переменных и значения прочности на сжатие геополимерного камня приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер образца	План в кодированных переменных			План в натуральных переменных			Прочность на сжатие Rсж, МПа	Концентрация, %	Характеристика смесей
	x1	x2	x3	Зола	NaOH	В/З			
1	1	1	1	1	0,19	0,350	1,40	35,3	BC
2	-1	1	1	0,6	0,19	0,350	1,48	47,6	Ж
3	1	-1	1	1	0,09	0,350	2,97	20,5	С
4	-1	-1	1	0,6	0,09	0,350	1,33	30,1	BC
5	1	1	-1	1	0,19	0,169	3,03	53,1	С
6	-1	1	-1	0,6	0,19	0,169	3,10	65,3	-
7	1	-1	-1	1	0,09	0,169	2,13	34,8	С
8	-1	-1	-1	0,6	0,09	0,169	1,40	47,1	С
9	1	0	0	1	0,14	0,259	2,24	35,1	BC
10	-1	0	0	0,6	0,14	0,259	1,93	47,4	П
11	0	1	0	0,8	0,19	0,259	1,99	47,9	П
12	0	-1	0	0,8	0,09	0,259	2,05	30,3	BC
13	0	0	1	0,8	0,14	0,350	1,18	33,4	Ж
14	0	0	-1	0,8	0,14	0,169	3,48	50,9	BC
15	0	0	0	0,8	0,14	0,259	2,08	40,3	П
16	0	0	0	0,8	0,14	0,259	2,05	40,3	П
17	0	0	0	0,8	0,14	0,259	2,13	40,3	П

Примечание. С – сухая; BC –сухая, в процессе перемешивания стала пластичной; П – пластичная; Ж – очень пластичная

Внешний вид образцов геополимерного камня после твердения при температуре 60°C в течение 24 часов представлен на рисунке 1. На образцах 6, 10 и 11 появлялись капли влаги, что свидетельствовало о высоком значении принятого водозольного (В/З) отношения. После извлечения из сушильного шкафа на поверхности образцов 2, 4, 5, 9 и 15

начинал формироваться белый налет игольчатой структуры. Причиной высолообразования может быть пересыщение геополимера щелочным раствором, и как следствие, выделением на поверхности образцов щелочного активатора, не вступившего в реакцию. В работе [6] отмечается, что после формирования структуры геополимера молекулы щелочи, не участвующие в формировании каркаса алюмосиликатных тетраэдров, начинают выкристаллизовываться на поверхности формируемого материала. При концентрации NaOH более 62% наблюдается рыхлая структура. Образцы 3, 7, 8, 12, 13, 14 не имели дефектов внешнего вида, при этом максимальная прочность получена при испытании образца 3 (2,97 МПа) и образца 14 (3,48 МПа), соответственно при концентрации гидроксида натрия 20,5% и 50,9%.

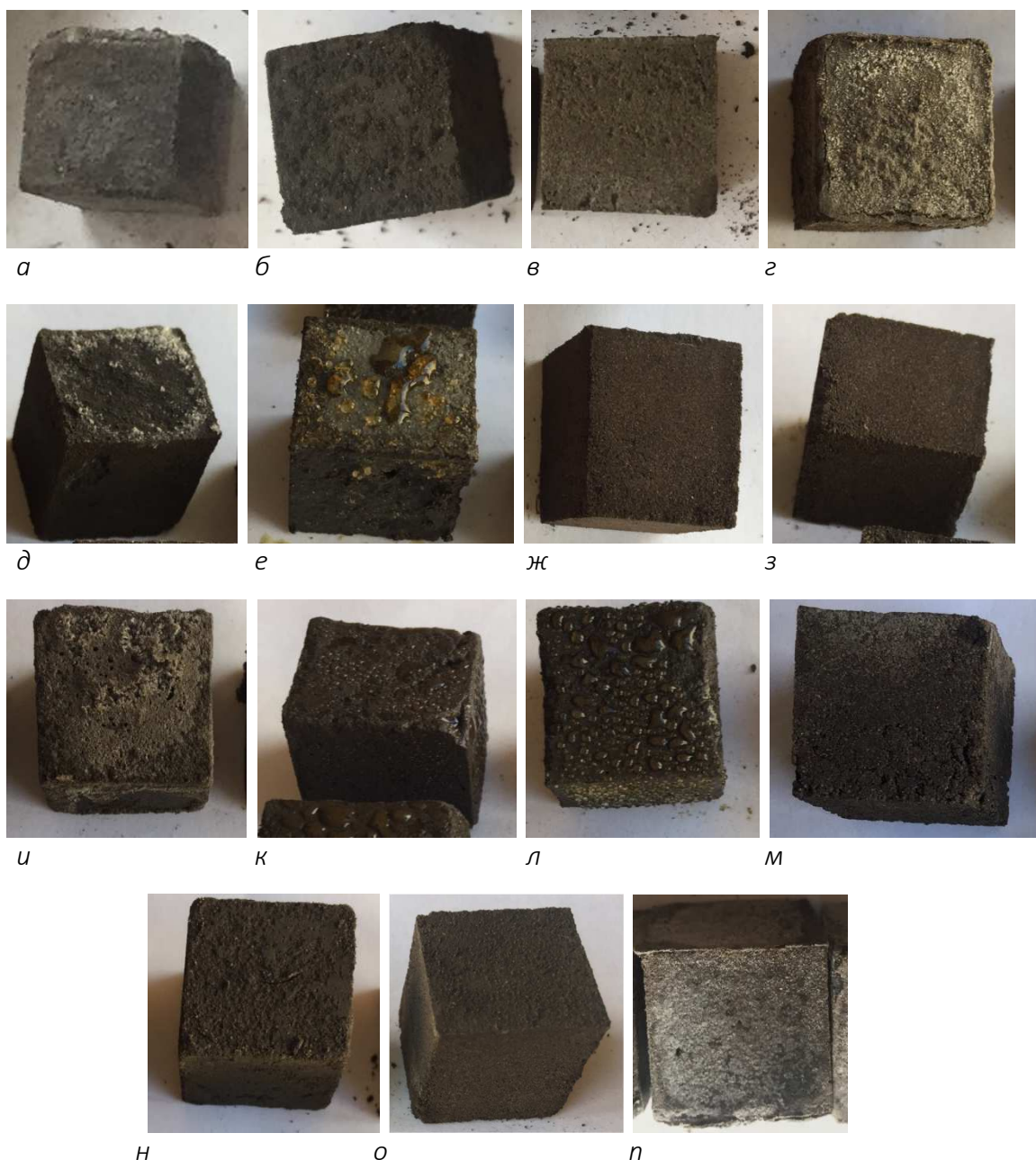


Рисунок 1 – Внешний вид образцов геополимерного камня после твердения при температуре 60 °C в течение 24 часов:

а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец №3; г – образец 4; д – образец 5; е – образец 6; ж – образец 7; з – образец 8; и – образец 9; к – образец 10; л – образец 11; м – образец 12; н – образец 13; о – образец 14; п – образец 15



Обработка экспериментальных данных методами математической статистики позволила получить полином второго порядка прочности на сжатие геополимерного камня. Графическая интерпретация полученного уравнения представлена на рисунке 2.

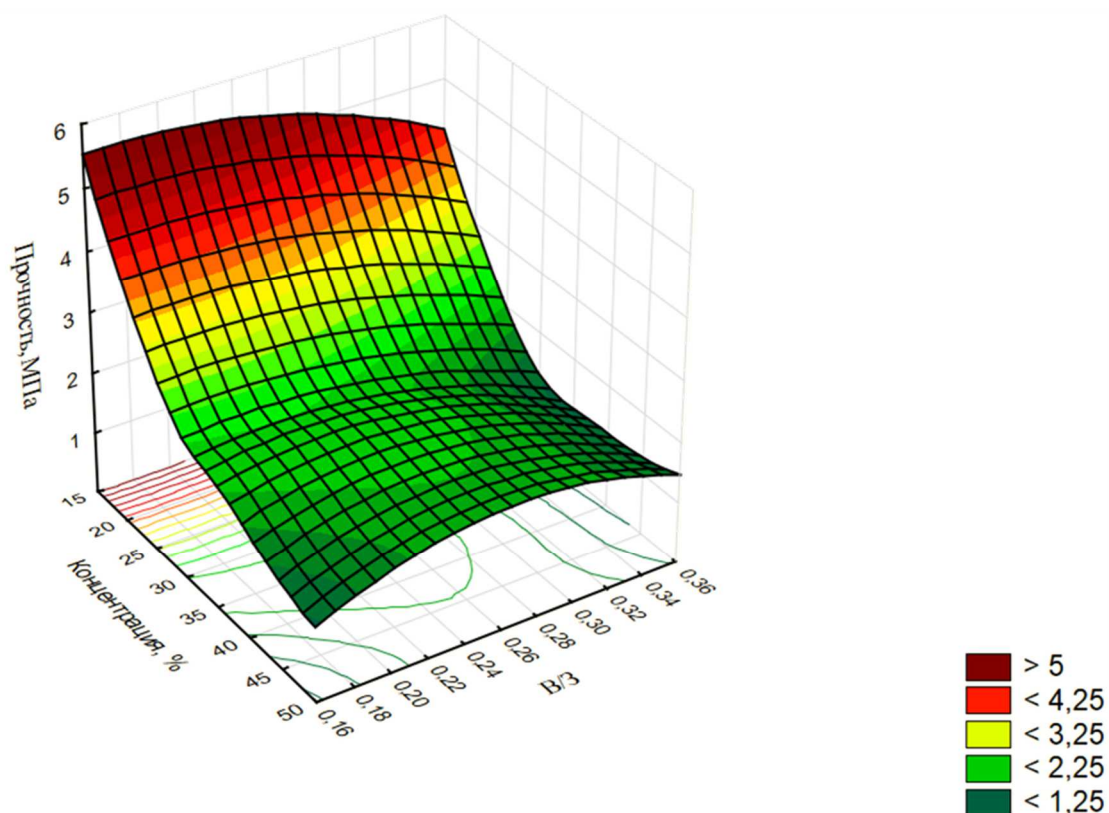


Рисунок 2. – Зависимость прочности геополимерного камня от концентрации щелочного активатора и водозольного отношения

Поверхность отклика, представленная на рисунке 2, показывает, что выбранный диапазон варьирования факторов не охватывает зону экстремума функции. Для определения оптимальной концентрации щелочного активатора дальнейшие исследования проводились на составах 3 и 14 при постоянном водозольном отношении путем изменения количества сухого вещества гидроксида натрия в воде затворения. Полученные результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Оптимизация концентрации щелочного активатора

Номер образца	Расход материалов			Прочность на сжатие $R_{сж}$ , МПа через 24 часа после термической обработки
	Зола	Концентрация, %	В/З	
3**	1	22,9	0,350	2,7
3	1	20,5	0,350	2,97
3*	1	18	0,350	3,9
3^	1	15,7	0,350	2,8
3^^	1	13,4	0,350	2,1
14	0,8	50,9	0,169	3,48
14**	0,8	44	0,169	3,26
14*	0,8	34,8	0,169	2,16

**Выводы.** Золошлаковая смесь, образующаяся на Белорусской ГРЭС г.п. Ореховск Витебской области при сжигании древесной щепы (50%) и торфа (50%), может использоваться в качестве сырья для получения геополимерного вяжущего. Оптимальная концентрация гидроксида натрия NaOH составила 18% при водозольном отношении В/З=0,35. Максимальная прочность геополимерного камня составила  $R_{сж} = 4$  МПа. Увеличение полученных показателей прочности может быть достигнуто за счет оптимизации температуры тепловой обработки геополимерного камня и значений удельной поверхности золы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ерошкина, Н.А. Использование золы ТЭС в технологии геополимерных строительных материалов / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, И.В. Коровченко // Молодой ученый. – 2015. – №7. – С. 117–120.
2. Стасевич, К.А. Сколько углекислого газа «съедает» цемент / К.А. Стасевич // Наука и жизнь. – 2016. – Вып. № 11. – С. 14–20.
3. Парфенова, Л.М. Режимы и способы активации золошлаковых отходов теплоэлектростанций / Л.М. Парфенова, В.В. Бозылев, А.П. Шведов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 8. – С. 57–60.
4. Ерошкина, Н.А. Принципы выбора сырьевых компонентов в технологии получения геополимеров на основе золы-уноса / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, М.Ю. Чамурлиев // Теория. Практика. Инновации. – 2017. – № 5 (17). – С. 7–16.
5. Ерошкина, Н.А. Свойства геополимерного вяжущего на основе Том-Усинской ГРЭС / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, И.В. Коровченко // Новый университет. Сер. Техн. науки. – 2014. – № 12 (34). – С. 30–34.
6. Чижов, Р.В. Зависимость прочностных характеристик геополимерного камня от условий набора прочности / Р.В. Чижов, В. В. Строкова // V Международный семинар-конкурс молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей : сб. докладов / Международное аналитическое обозрение «ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси»; сост.: кол. авторов. – СПб., 2015. – С. 100–105.

## КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ТЕНЗОМЕТРИИ

Д.Н. Шабанов, А.Н. Ягубкин, Е.А. Трамбицкий  
Полоцкий государственный университет, Беларусь  
email: d.shabanov@psu.by, a.yagubkin@psu.by

*Рассматривается вопрос эффективности использования тензодатчиков при исследовании деформационных характеристик бетона. Описана технология изготовления глубинных датчиков. Сделан вывод о целесообразности применения данного типа датчиков при исследовании деформирования бетона. Проведена регистрация структурных изменений при нормальных напряжениях посредством глубинных тензометрических датчиков. Для оптимизации рецептурных и технологических факторов в силикатных композициях были использованы результаты проведенного 3-факторного эксперимента*

*Ключевые слова: бетон, деформация, тензодатчики, глубинный датчик, мониторинг, информационное моделирование, математическое планирование.*

## CONTROL OF STRESSED-DEFORMED STATE OF CONCRETE STRUCTURES USING THE METHOD OF TENSOMETRY

D. Shabanov, A. Yagubkin, E. Trambitsky  
Polotsk state university, Belarus  
email: d.shabanov@psu.by, a.yagubkin@psu.by

*In this article, the effectiveness of the use of strain gauges in the study of deformation characteristics of concrete is considered. The technology of manufacturing deep sensors is described. A conclusion is made about the advisability of using this type of sensors in the study of concrete deforming. Structural changes were recorded at normal stresses by means of deep sensors. The results of the 3-factor experiment were used to optimize the formulation and technological factors in silicate compositions*

*Keywords: concrete, deformation, strain gauges, deep sensor, monitoring, information modeling, mathematical planning.*

**Введение.** Обеспечение высокой надежности создаваемых конструкций и оптимизация параметров расчета в значительной степени определяются наличием информации о физико-механических свойствах используемых материалов. В настоящее время накоплено большое количество сведений о стандартных механических характеристиках поведения бетона различной прочности [6].

Механизм разрушения бетона, как известно, связан с образованием и развитием микро- и макротрещин при действии нагрузки. Причиной появления первых микротрещин является концентрация напряжений вблизи дефектов структуры: пор, включений, дислокаций. Согласно современным представлениям микротрещины появляются при низких уровнях напряжений –  $\sigma_{\text{с}} = 0,3f_{\text{с.т}}$ . Разрушение бетона начинается с развития трещин в контактной зоне (матрица – заполнитель) с их последующим выходом в матрицу.

Контактные трещины развиваются под действием сдвиговых, а трещины в матрице – растягивающих напряжений [4].

Все эти случаи вызываются расширением (давлением) или сжатием внутрислойной фазы, приводящим к деформациям структуры, затем к напряжениям, при критическом значении которых в структуре образуются трещины [8].

Для корректного определения остаточного ресурса конструкций исходные данные необходимо определять по результатам натурных испытаний и измерений. К сожалению, для большинства конструкций получение достоверных исходных данных затруднено, что естественно снижает корректность расчетов. Величины напряжений, возникающих в конструкциях, как правило, принимаются по результатам формализованных расчетов, что не отражает действительной работы конструкции. Возникает необходимость искать достоверные оперативные способы получения исходных данных для расчетов непосредственно с натурных конструкций. Выходом из создавшегося положения является применение телеметрических систем контроля за состоянием объектов [7].

В настоящее время использование тензорезисторов дает возможность следить за развитием деформаций в конструкциях. Метод тензометрирования заключается в определении напряженного состояния путем измерения деформаций, постоянных упругости и деформативности бетона с последующим вычислением напряжений. Благодаря простоте, дешевизне и хорошему качеству выпускаемых промышленностью тензорезисторов, этот метод нашел широкое применение в практике экспериментальных исследований строительных конструкций [11].

Результаты исследований, изложенные в работах [3-6], свидетельствуют о перспективности применения глубинных датчиков для исследования напряженно-деформированного состояния бетона. Основными преимуществами являются простота их изготовления, точность и возможность использования традиционных измерительных тензометрических систем [1].

Основной целью является: разработка эффективного средства мониторинга напряженно-деформированного состояния бетонной конструкции, а также системы, которая позволит регистрировать и обрабатывать входящие данные.

**Исследовательская часть.** Для решения поставленной задачи, творческим коллективом были изготовлены прототипы глубинных тензодатчиков для более детального изучения развития деформаций в бетонных образцах.

Для изготовления, основой служила методика, предложенная Р.О. Красноровским в исследовании [2]. Данное исследование также показало, что применение такого типа датчика дает хорошую сходимость экспериментальных и теоретических данных.

Полученный таким образом глубинный тензодатчик представлен на рисунке 1.

В качестве опытного образца использовалась бетонная призма с размерами 100x100x200 мм. Состав бетонной смеси из расчета на 1м<sup>3</sup>: портландцемент марки 400 – 1500 кг, песок – 500 кг, вода – 300 л.

Для фиксации датчиков в металлической форме использовалась натянутая проволока малого диаметра. Два датчика размещались взаимно перпендикулярно друг другу (по направлениям развития главных деформаций) с зазором, чтобы они не соприкасались. Схема расположения глубинных тензодатчиков в образце-призме представлена на рисунке 2.

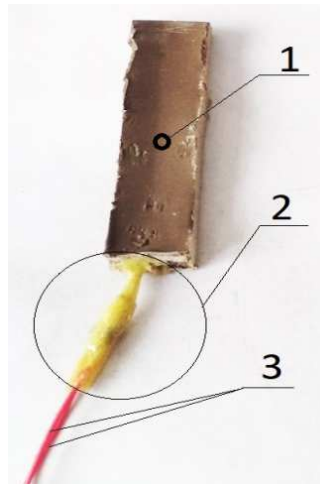


Рисунок 1. – Общий вид изготовленного глубинного датчика:  
1 – глубинный датчик; 2 – устройство изоляции, позволяющее использовать глубинные датчики в бетонных смесях; 3 – выводы проводов

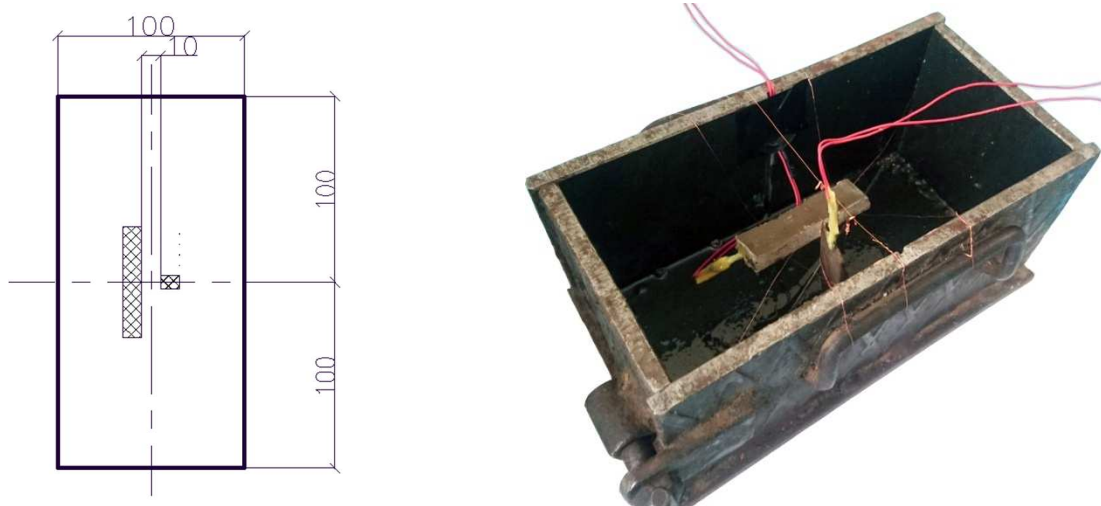


Рисунок 2. – Схема расположения глубинных датчиков в опалубке

Измерение показателей датчиков осуществлялось с помощью тензометрической системы, выполненной по схеме «полный мост».

При измерениях тензометрической аппаратурой важно обеспечить четкую запись исследуемого процесса. Перед началом и в конце измерений на вольтметре должен записываться тарировочный сигнал каждого канала аппаратуры.

Схематический вид собранной испытательной установки изображен на рисунке 3.



Рисунок 3. – Оборудование, использованное для тарирования датчиков:  
1 – вольтметр; 2 – бетонный образец с установленными глубинными датчиками;  
3 – источник питания постоянного тока

**Измерение собственных деформаций бетона с применением индикатора часового типа и глубинного датчика.** При контакте с жидкостью или с влажным воздухом происходит поглощение бетоном влаги путем капиллярного впитывания или капиллярной конденсации. При увлажнении, в бетоне, устанавливается капиллярное равновесие, т.е. происходит самопроизвольное внутрискруктурное перераспределение влаги. В капиллярах возникает отрицательное капиллярное давление, которое в структуре с податливыми стенками оказывает стягивающее действие на ограничивающие жидкость стенки, что приводит к значительной объемной деформации цементного камня и бетона. Если имеются препятствия проявлению набухания или они протекают неравномерно по объему, возникают напряжения. Деформации и напряжения, проявляющиеся без воздействия внешних сил и нагрузок, принято называть собственными [8].

Исследование структурных изменений бетона, удобнее всего изучить при помощи планового эксперимента. Так как выбор плана – это всегда компромиссное решение, то нами был выбран план эксперимента для полиномиальных моделей второго порядка. При решении абсолютного большинства задач анализа и оптимизации композиционных материалов необходимо получить с заданной точностью описание поведения системы. Этим условиям удовлетворяют полиномиальные модели. Полиномиальная модель должна учитывать, прежде всего, нелинейность влияния рецептурно-технологических факторов на выход и явление синергизма [9].

Анализируя результаты исследований [3–6], можно сделать вывод, что показания индикатора часового типа имеют схожую зависимость с показаниями глубинных тензодатчиков, рассмотренных ранее.

В ходе исследования собственных деформаций бетона был реализован следующий трёхфакторный эксперимент и получены данные о величине средних деформациях, испытываемых бетонными образцами под действием одноосной направленной нагрузки. Боковые грани бетонных образцов были зафиксированы, поэтому изменения регистрировались на верхней поверхности и глубинными датчиком. Факторы и уровни их варьирования для данного эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Границы варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначение фактора	Единицы измерения	Границы варьирования		
			-1	0	+1
Процент ввода вяжущего	$X_1$	%	15	20	25
Время изотермического прогрева	$X_2$	Час	4	7	10
Давление пара в автоклаве	$X_3$	МПа	0,8	1	1,2

Данные обработаны в программе PlanExpB13-D (рис. 4). При испытании образцов отсутствовали повторные опыты, что не позволяет напрямую оценить дисперсию воспроизводимости эксперимента.

В результате были получены следующие полиномиальные модели:

$$Y = 31,659 - 2,16 \cdot x_2 + 1,714 \cdot x_3 - 2,21 \cdot x_2^2 + 5,198 \cdot x_3^2 - 11,224 \cdot x_2 \cdot x_3 \dots (1)$$

$$Y = 31,659 - 3,23 \cdot x_1 + 1,714 \cdot x_3 + 19,572 \cdot x_1^2 + 5,198 \cdot x_3^2 + 0,664 \cdot x_1 \cdot x_3 \dots (2)$$

$$Y = 31,659 - 3,23 \cdot x_1 - 2,16 \cdot x_2 + 19,572 \cdot x_1^2 - 2,21 \cdot x_2^2 - 7,974 \cdot x_1 \cdot x_2 \dots (3)$$

2 План трехфакторного эксперимента типа "В-D13":

№ опыта (u)	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Выходной параметр		
	x1	x2	x3	Процесс	Время	Давление	Y(u, 1)	Y(u, 2)	Y(u, 3)
1	-1	-1	-1	15	4	0,8	39,4		
2	+1	-1	-1	25	4	0,8	47,6		
3	-1	+1	-1	15	10	0,8	73,5		
4	-1	-1	+1	15	4	1,2	64		
5	-1	0,19	0,19	15	7,57	1,038	55,5		
6	0,19	-1	0,19	20,95	4	1,038	36		
7	0,19	0,19	-1	20,95	7,57	0,8	36,5		
8	-0,29	+1	+1	18,55	10	1,2	28		
9	+1	-0,29	+1	25	6,13	1,2	62		
10	+1	+1	-0,29	25	10	0,942	39		

Наименование выходного параметра: Средние деформации Число измерений в опыте: 1

Рисунок 4. – Блок расчета плана эксперимента и ввода значений выходных параметров в программе PlanExpB13-D

Для данных моделей, в программе STATISTICA 10 были построены соответствующие поверхности отклика (рис. 5).

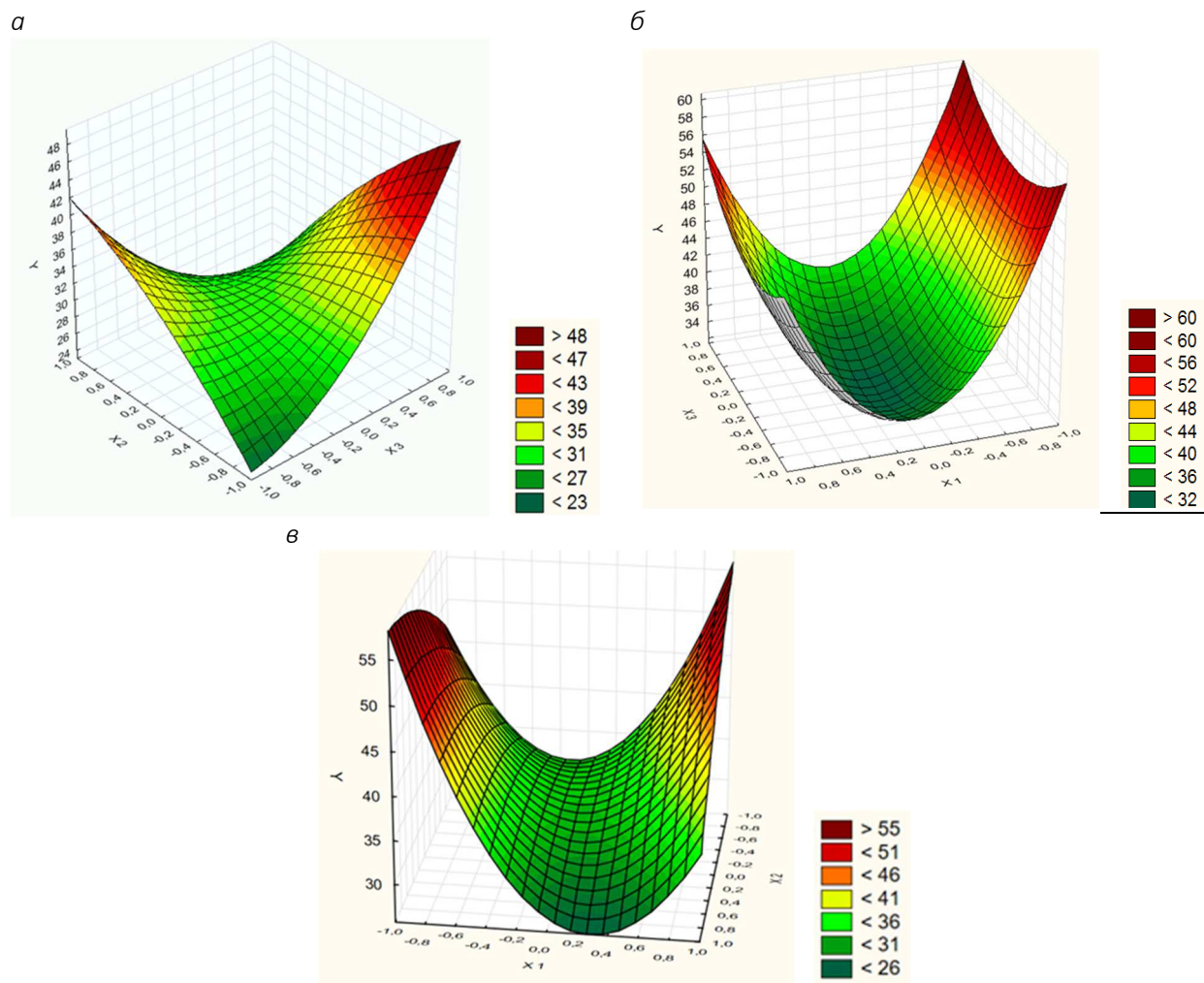


Рисунок 5. –Построенные поверхности отклика:  
а –  $x_1 = \text{const}$ ; б –  $x_2 = \text{const}$ ; в –  $x_3 = \text{const}$

На основании данных поверхностей также были получены оптимальные области для фактора  $x_1$  – 17-22,5(%);  $x_2$  – 4-4.36(ч.),  $x_3$  – 0,9-1,04(МПа).

По полученным экспериментальным данным, планируется выполнение компьютерного моделирования. Результаты виртуальных испытаний дадут более широкую картину происходящих процессов, чем натурный эксперимент, предоставляя больше возможностей для оптимизации и улучшения эксплуатационных характеристик. Применение численно-экспериментальных методов исследований, позволят дополнить результаты натурных испытаний результатами имитационного моделирования, которые недостижимы в натурном эксперименте [9].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Макаренко, С.Ю. Применение глубинных датчиков на основе тензорезисторов при исследовании деформаций ползучести тяжелого бетона / С.Ю. Макаренко // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы : материалы науч.-практ. конф., посвященной 90-летию со дня рождения профессора Н.Н. Леонтьева и 110-летию профессора В.З. Власова. – МГСУ, 2017. – С. 74–77.
2. Красновский, Р.О. О методике испытания железобетонных балок на действие поперечных сил / Р.О. Красновский // Методика лабораторных исследований деформаций и прочности бетона, арматуры и железобетонных конструкций. – М. : Госстройиздат, 1962. – С. 160–173.
3. Исследование деформативности бетонных колонн методом глубинной тензометрии / Г.Л. Ватуля [и др.] // Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво. – 2014. – К.3 (2). – С. 30–36.
4. Ватуля, Г.Л. Определение деформаций бетона с помощью глубинных датчиков / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагуря, Д.Г. Петренко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – К. 2. – С. 48–56.
5. Ватуля, Г.Л. Определение механических характеристик конструкций с помощью глубинных датчиков / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагуря, Д.Г. Петренко // Будівельна механіка і гідроліка : зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2016. – Вып.138. – С. 231–235.
6. Безгодов, И.М. К вопросу о методике исследования бетона в условиях трехосного сжатия [Электронный журнал] / И.М. Безгодов, И.А. Горбунов, П.Ю. Шульгин // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2010. – Режим доступа: <http://pamag.ru/src/pressa/076.pdf>.
7. Шешуков, А.Н. Применение телеметрических систем для мониторинга напряженно деформированного состояния конструкций / А.Н. Шешуков, С.В. Мальцев, Р.П. Богуш ; под ред. Д.Н. Лазовского // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений : сб. научн. тр. – Минск, 2001. – С. 402–404.
8. Подвальный, А.М. Механизм проявления в бетоне собственных деформаций и напряжений / А.М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 2007. – № 4. – С. 13–16.
9. Физико-механические, силовые, энергетические и структуроформирующие параметры бетона / К.А. Пирадов [и др.] // Бетон и железобетон. – 2002. – № 2. – С. 10–12.
10. Инженерный анализ средствами T-FLEX [Электронный ресурс] – 2016. – Режим доступа: <http://tflex.ru/about/publications/detail/index.php?ID=3941>. – Дата доступа: 30.03.18.
11. Ватуля, Г.Л. Тарировка и определение точности показаний глубинного датчика / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагуря, Д.Г. Петренко // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – Пермь, 2014. – С. 375–380.



## ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ОЧЕСОВ ВОЛОКНА ЛЬНА

С.А. Романовский, А.А. Бакатович

Полоцкий государственный университет, Беларусь

e-mail: s.romanovskiy@psu.by, a.bakatovich@psu.by

*Приведены составы утеплителей на основе очёсов и волокон льна, позволяющие получить теплоизоляционные плиты с высокими теплофизическими характеристиками. Рассмотрены результаты исследований по получению нерастворимого жидкого стекла в качестве вяжущего с применением минеральных добавок. Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на физико-механические характеристики теплоизоляционных материалов из льняных волокон или очесов. По итогам испытаний получены полиномиальные модели основных характеристик теплоизоляционных плит из очесов льна в кодированных переменных.*

*Ключевые слова: очесы льна, льняные волокна, утеплитель, жидкое стекло, физико-механические характеристики.*

## INFLUENCE OF MAIN FACTORS ON PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF HEAT-INSULATING MATERIAL FROM NOILS FLAX FIBER

S. Romanovskiy, A. Bakatovich

Polotsk State University, Belarus

e-mail: s.romanovskiy@psu.by, a.bakatovich@psu.by

*The compounds of heaters based on noils and fibers of flax allowing receiving heat-insulating plates with high heatphysical characteristics are given. Results of researches on receiving insoluble liquid glass as knitting with use of mineral additives are considered. The factors exerting the greatest impact on physic-mechanical characteristics of heat-insulating materials from linen fibers or noils are defined. Following the results of tests polynomial models of the main characteristics of heat-insulating plates from flax noils in encoded variables are received.*

*Keywords: flax noils, linen fibers, heater, liquid glass, physic-mechanical characteristics.*

**Введение.** В условиях мирового энергетического кризиса развитие производства эффективных строительных материалов и экономия топливно-энергетических ресурсов, включая минимизацию тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий, сооружений и технологического оборудования относится к приоритетным задачам. Основным решением по снижению энергозатрат на отопление зданий является повышение термического сопротивления ограждающих конструкций с помощью эффективных теплоизоляционных материалов.

В странах Европы особое внимание в технологиях получения теплоизоляционных материалов уделяется использованию волокнистых отходов растительного происхождения, образующиеся после сбора или переработки урожая [1]. Увеличение объемов применения растительных отходов не только обеспечит строительство дополнительным сырьём и расширит номенклатуру местных строительных материалов, но и будет способствовать сохра-

нению и рациональному использованию природных ресурсов [2]. Таким образом, основываясь на указанных критериях, создание новых эффективных теплоизоляционных материалов на волокнистом сырье растительного происхождения, является весьма актуальным направлением в промышленности изоляционных материалов.

**Материалы и методы.** Основной комплекс исследований по определению физико-механических характеристик образцов выполняли отдельно на заполнителях из очесов или волокна льна, получаемых на Поставском льнозаводе (Беларусь) и отвечающие требованиям ГОСТ Р 53486 [3] и СТБ 1195-2008 [4]. При изготовлении теплоизоляционных плит в качестве вяжущего использовали натриевое жидкое стекло ОАО «Домановский производственно-торговый комбинат», соответствующее требованиям ГОСТ 13078 [5]. В исследованиях использовали волокна льна длиной до 25 см и очесы длиной 5–10 см.

При изготовлении исследуемых образцов соблюдали определенную последовательность выполнения технологических операций. Предварительно производили дозировку компонентов. Для образцов из очёсов льна добавляли жидкое стекло к заполнителю и перемешивали. Утеплитель на основе волокна льна изготавливали послойной пропиткой жидким стеклом полотен из волокон. Образцы выдерживали в форме 6 часов при температуре  $20 \pm 2$  °С, а затем высушивали в течение 4 часов в сушильном шкафу при температуре 45–55 °С.

Среднюю плотность и теплопроводность определяли согласно ГОСТ 17177 [6] и СТБ 1618 [7] соответственно на образцах-плитах размером 250×250×50 мм. Прочность на сжатие при 10% деформации исследовали на образцах-кубах размером 100×100×100 мм по ГОСТ 17177 [6]. Водостойкость натриевого жидкого стекла определяли методом высушивания с использованием фланелевой ткани, приведенной в работе [7].

Обработку опытных данных при проведении трехфакторного эксперимента осуществляли методом регрессионного анализа с применением программы «Statistica 10». Математическую обработку результатов производили в соответствии с [8–10].

**Экспериментальные исследования.** Первоначально для определения условий структурообразования теплоизоляционных материалов варьировали среднюю плотность при постоянном расходе жидкого стекла – 10 кг. Результаты исследований физико-механических характеристик полученных образцов приведены на рисунках 1–3. Зависимость коэффициента теплопроводности от средней плотности теплоизоляционных плит показана на рисунке 1.

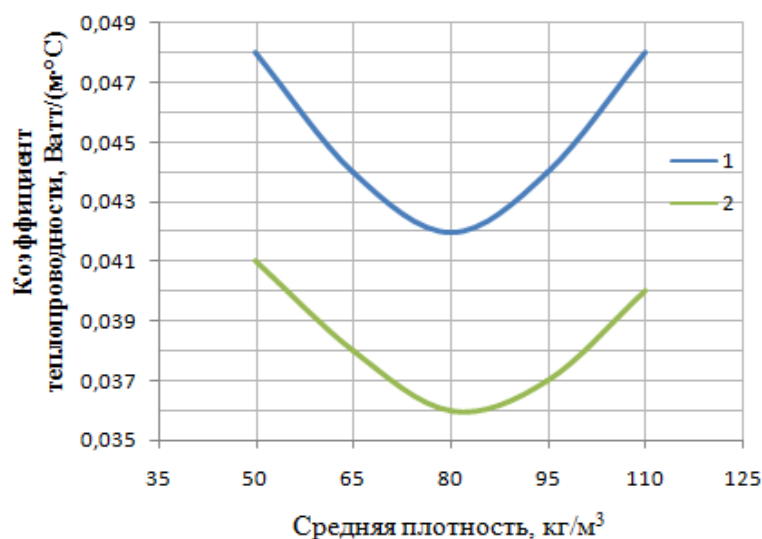


Рисунок 1. – Зависимость коэффициента теплопроводности от средней плотности:  
1 – образцы из волокон льна; 2 – образцы из льняных очесов

Анализ полученных зависимостей (рис. 1) позволяет сделать вывод о том, что увеличение количества заполнителя с целью повышения плотности утеплителя до  $80 \text{ кг/м}^3$  независимо от вида волокон приводит к уменьшению теплопроводности, а дальнейший рост плотности вызывает повышение исследуемого параметра. Достаточно высокая теплопроводность при плотности менее  $50 \text{ кг/м}^3$  обусловлена тем, что в процессе изготовления образцов формируется рыхлая волокнистая структура, способствующая прохождению через материал теплых воздушных потоков. При малой плотности волокна льна недостаточно плотно прилегают друг к другу, что приводит к образованию сетчатой структуры со сквозными пустотами, обеспечивающих перенос потоков теплового воздуха. Постепенное увеличение количества заполнителя до плотности утеплителя  $80 \text{ кг/м}^3$  способствует уменьшению объема и размеров пустот с одновременной локализацией на отдельные замкнутые микропространства, не сообщающиеся друг с другом. Стоит отметить, что численность соприкосновений волокон между собой значительно увеличивается и материал приобретает плотную, жесткую структуру, функционирование сквозных воздушных потоков прекращается. При последующем повышении количества заполнителя до плотности  $110 \text{ кг/м}^3$ , численность замкнутых микропустот, с отсутствием циркуляции в них воздуха, резко сокращается, площадь и количество точечных контактов между волокнами значительно увеличивается, что в совокупности ведет к повышению теплопроводности. Например, при плотности утеплителя на основе очесов льна  $50 \text{ кг/м}^3$  теплопроводность составляет  $0,041 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ . Снижение коэффициента теплопроводности до  $0,036 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$  происходит при увеличении плотности в 1,6 раза до  $80 \text{ кг/м}^3$ . Дальнейшее возрастание средней плотности до  $110 \text{ кг/м}^3$  приводит к повышению теплопроводности до  $0,04 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ . Для плит из волокон льна установлена аналогичная зависимость, так минимальное значение коэффициента теплопроводности  $0,042 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$  соответствует плотности  $80 \text{ кг/м}^3$ . При уменьшении плотности до  $50 \text{ кг/м}^3$  и увеличении до  $110 \text{ кг/м}^3$  установлено повышение коэффициента теплопроводности на 14% до  $0,048 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ .

Таким образом установлено, что наилучшими показателями теплопроводности обладают теплоизоляционные плиты на основе очесов волокна льна. При плотности утеплителя на основе волокон льна  $80 \text{ кг/м}^3$  коэффициент теплопроводности составляет  $0,042 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ . При замене льняных волокон очесами льна происходит снижение теплопроводности на 20% до значения, равного  $0,036 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ .

Влияние средней плотности на прочность материала при 10% деформации приведено на рисунке 2.

Из полученных результатов (см. рис. 2) следует, что увеличение плотности теплоизоляционных плит при постоянном расходе вяжущего приводит к повышению прочности на сжатие при 10% деформации. При плотности  $50 \text{ кг/м}^3$  теплоизоляционных плит из очесов льна прочность на сжатие составляет  $0,11 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$ . Увеличение средней плотности в 2,2 раза приводит к повышению прочности в 3,2 раза до  $0,35 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$ . Образцы утеплителя на основе волокон льна при максимальной плотности  $110 \text{ кг/м}^3$  достигают прочности равной  $0,45 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$ . Снижение плотности до  $50 \text{ кг/м}^3$  вызывает понижение показателя прочности на сжатие при 10% деформации в 2,5 раза. Необходимо отметить, что в исследуемом диапазоне плотности, прочность на сжатие выше у теплоизоляционных материалов на основе волокон льна в среднем на 46% по сравнению с утеплителями из очёсов волокна льна.

При средней плотности  $50 \text{ кг/м}^3$  рыхлая волокнистая структура утеплителя, обладающая значительным объемом пустотного пространства и относительно небольшим количеством соприкосновений между волокнами, не обеспечивает высоких прочностных характеристик материала. Повышение прочности при плотности  $110 \text{ кг/м}^3$  обусловлено формиро-

ванием плотной волокнистой структуры с возросшим количеством и с увеличенной общей площадью контактных точек в процессе уплотнения волокнистого заполнителя утеплителя.

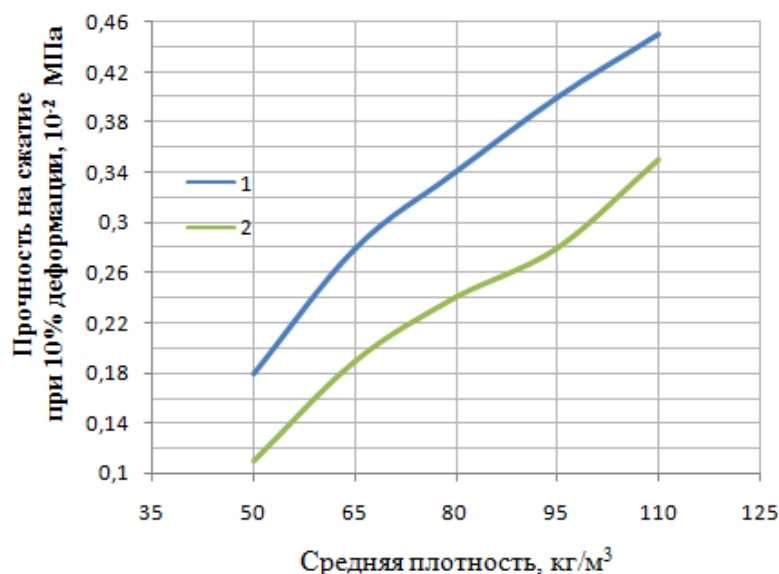


Рисунок 2. – Зависимость прочности на сжатие при 10% деформации от средней плотности:  
1 – образцы из волокон льна; 2 – образцы из льняных очесов

На рисунке 3 приведена зависимость давления формования от средней плотности.

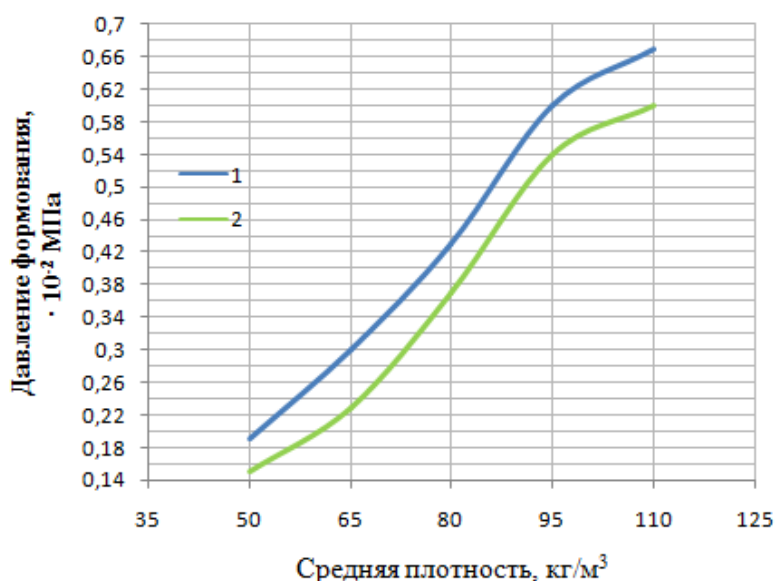


Рисунок 3. – Зависимость давления формования от средней плотности:  
1 – образцы из волокон льна; 2 – образцы из очесов льна

Из анализа полученных данных следует, что давление формования напрямую связано с плотностью утеплителя. При повышении количества волокнистого заполнителя увеличивается средняя плотность, что обуславливает возрастание давления формования при уплотнении структуры утеплителя. В среднем, давление формования образцов из волокон льна превышает значение плит из очесов льна на 17 %. Необходимо обеспечивать большее давление формования образцов из волокон льна по причине большей упругости волокон, воз-

никающей в результате их большего диаметра и длины. Для образцов из очесов льна при плотности  $110 \text{ кг/м}^3$  максимальное давление составляет  $0,6 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$  и возрастает в 4 раза относительно показателя при плотности  $50 \text{ кг/м}^3$ . С увеличением плотности плит из волокон льна от  $50$  до  $110 \text{ кг/м}^3$  давление формования увеличивается в 3,5 раза и равно  $0,67 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$ . Следует отметить, что максимальное давление формования позволяет получать плотную структуру, обеспечивающую минимальную пустотность в материале, при наибольшем количестве точек контакта между волокнами.

На втором этапе исследований при постоянном расходе волокнистого заполнителя ( $70 \text{ кг}$ ) среднюю плотность утеплителя изменяли путем варьирования расхода вяжущего – жидкого стекла. За базовый принимали состав плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$  из первой части исследований. Физико-механические характеристики теплоизоляционных плит приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Физико-механические характеристики теплоизоляционных плит

№ состава	Вид заполнителя	Расход натриевого жидкого стекла, кг	Средняя плотность, $\text{кг/м}^3$	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	Прочности на сжатие при 10% деформации, $\cdot 10^{-2} \text{ МПа}$	Давления формования, $\cdot 10^{-2} \text{ МПа}$
1	Волокна льна	5	75	0,04	0,3	0,48
2		10	80	0,042	0,33	0,42
3		15	85	0,044	0,38	0,38
4		20	90	0,049	0,45	0,35
5	Льняные очесы	5	75	0,035	0,22	0,41
6		10	80	0,036	0,24	0,36
7		15	85	0,039	0,28	0,32
8		20	90	0,043	0,36	0,3

Полученные данные (см. табл. 1) свидетельствуют о том, что наилучшими показателями теплопроводности характеризуются образцы с наименьшим расходом связующего. При этом, теплопроводность материала на основе льняных волокон (состав 1) при плотности  $75 \text{ кг/м}^3$  превышает на 14 % показатель плит из очесов льна (состав 5). Увеличение средней плотности от  $75$  до  $90 \text{ кг/м}^3$  при постоянной массе заполнителя приводит к повышению теплопроводности утеплителей из волокон и очесов льна на 22% и 23% соответственно. Данная зависимость обусловлена тем, что толщина пленки из натриевого жидкого стекла, покрывающей волокна постепенно увеличивается и количество проводимого тепла через слой жидкого стекла возрастает.

Наибольшей прочностью в исследуемом диапазоне плотностей характеризуются материалы на основе волокон льна. Так, при плотности утеплителя из льняных волокон  $90 \text{ кг/м}^3$  (состав 4), прочность на сжатие на 20% больше, чем у плит на основе очесов льна (состав 8). Также установлено, что с увеличением расхода жидкого стекла происходит повышение прочности на сжатие при 10% деформации. Так, при возрастании плотности с  $75$  до  $90 \text{ кг/м}^3$  прочность утеплителя из очесов льна возрастает на 64%, а из льняных волокон на 50%. Данная зависимость обусловлена тем, что при увеличении средней плотности образуется более плотная структура утеплителя в связи с увеличением толщины пленки, покрывающей и придающей дополнительную жесткость волокнам, параллельно заполняющей пустоты. Кроме того, благодаря увеличению расхода связующего, повышается площадь каждого контакта между волокнами или очесами. На увеличение прочности также оказывает влияние больший диаметр волокна по сравнению с размером поперечного сечения элементарного волокна очёса.

Увеличение плотности утеплителя за счет повышения расхода жидкого стекла не зависимо от вида волокон приводит к уменьшению давления формования. С увеличением плотности от 75 до 90 кг/м<sup>3</sup> (составы 5-8) давление формования снижается на 27% и достигает 0,3 · 10<sup>-2</sup> МПа. Относительно начального давления 0,48 · 10<sup>-2</sup> МПа (состав 1) также и для составов из волокна происходит падение показателя на 27% (состав 4). Снижение давления формования при повышении плотности связано со смачиваемостью волокон. При повышении расхода жидкого стекла, вода, находящаяся в нем, впитывается волокнами или очесами льна, и способствует развитию временной пластичности и гибкости волокон, в результате снижается жесткость структурного каркаса из волокон.

С целью обеспечения долговечности теплоизоляционных плит в условиях повышенной влажности подбирали количество вводимой добавки из извести или гипса, а также двухкомпонентной добавки из извести и гипса с соотношении 1:1, обеспечивающей водостойкость натриевого жидкого стекла как вяжущего материала. Водостойкость жидкого стекла определяли по массе нерастворимого остатка вяжущего. На рисунке 4 представлена зависимость изменения водостойкости жидкого стекла от количества добавки.

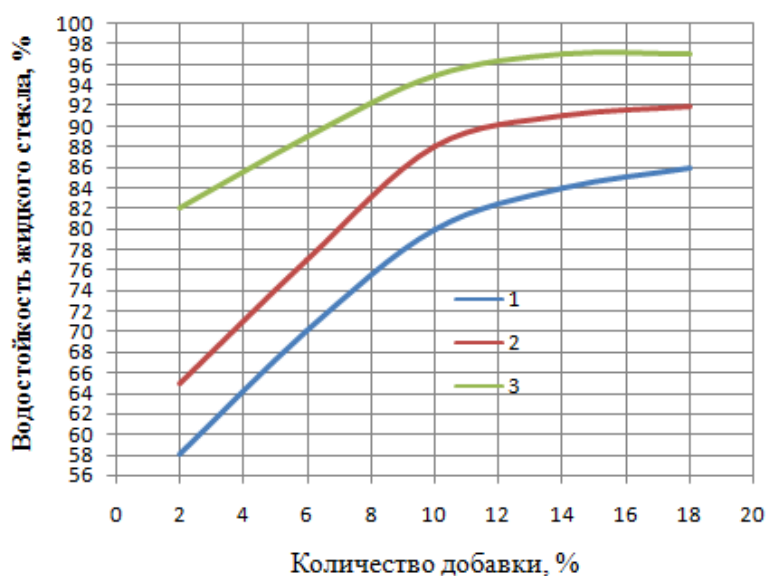


Рисунок 4. — Зависимость водостойкости жидкого стекла от количества добавки:  
1 — известь; 2 — гипс; 3 — известь и гипс

Основываясь на полученных результатах (рис. 4) оптимальное количество вводимых добавок составляет 8–14%. Введение извести при таких дозировках позволяет получить водостойкий остаток, равный 76–84% по массе. Растворимость жидкого стекла с добавкой гипса составляет не более 17% с образованием водостойкого остатка в количестве 83–91%. Двухкомпонентная добавка извести и гипса повышает водостойкость жидкого стекла до 92–97%. Исходя из экономической целесообразности, наиболее оптимальным является количество добавки из извести и гипса в пределах 10% от массы связующего, позволяющая обеспечить водостойкость жидкого стекла на уровне 95%.

По результатам комплексных исследований установлено, что основными факторами, оказывающими наибольшее влияние на физико-механические характеристики разработанных теплоизоляционных плит, являются: плотность утеплителя, расход вяжущего и количество добавки. Установленные в результате исследований границы варьирования для плит из очёсов

льна позволили реализовать 3-х факторный эксперимент по плану Бокса ( $n_0=1$ ). Факторы и интервалы варьирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Единицы измерения	Обозначения в кодированных переменных	Уровни факторов			Интервалы варьирования факторов
			-1	0	+1	
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	$X_1$	40	80	120	40
Расход вяжущего	массовая доля	$X_2$	0,08	0,14	0,2	0,06
Количество добавки в общем расходе вяжущего	массовая доля	$X_3$	0,06	0,1	0,14	0,04

Произведенная проверка значимости найденных коэффициентов регрессии позволила получить полиномиальные модели давления формования, коэффициента теплопроводности, предела прочности на сжатие при 10% деформации, водостойкости теплоизоляционных плит из очесов волокна льна. Полиномиальные модели выходных величин в кодированных переменных имеют следующий вид:

– *давление формования:*

$$Y_1=0,354+0,2648 \cdot X_1-0,0279 \cdot X_2-0,017625 \cdot X_1 \cdot X_2;$$

– *коэффициент теплопроводности:*

$$Y_2=0,03725+0,0008 \cdot X_1+0,0017 \cdot X_2+0,00495 \cdot X_1^2+0,000875 \cdot X_1 \cdot X_2;$$

– *предел прочности на сжатие при 10% деформации:*

$$Y_3=0,2675+0,142 \cdot X_1+0,019 \cdot X_2+0,005 \cdot X_3-0,0175 \cdot X_1^2+0,01 \cdot X_1 \cdot X_2;$$

– *водостойкость:*

$$Y_4=94,02+0,54 \cdot X_1+0,31 \cdot X_2+4,67 \cdot X_3-0,42 \cdot X_1^2-2,17 \cdot X_3^2+0,29 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

**Заключение.** По результатам исследований получены эффективные теплоизоляционные плиты из очесов волокна льна плотностью 40–110 кг/м<sup>2</sup>, характеризующиеся теплопроводностью 0,035–0,043 Вт/(м·°С) и прочностью на сжатие при 10% деформации 0,11–0,36 · 10<sup>-2</sup> МПа. Установлены факторы и определены их границы, оказывающие наибольшее влияние на физико-механические характеристики теплоизоляционных материалов из очесов льна. Получены полиномиальные модели выходных величин в кодированных переменных, позволяющих получить утеплитель на основе льняных очесов с заданными параметрами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Давыденко, Н.В. Теплоизоляционные плиты на основе отходов растениеводства и неорганического вяжущего : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Н.В. Давыденко. – Новополюцк, 2016. – 28 с.
2. Якубов, С.Э. Теплопроводность и механические свойства строительных материалов на основе минерального и растительного сырья : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / С.Э. Якубов. – Душанбе, 2006. – 34 с.
3. Очёс льняной. Технические условия : ГОСТ Р 53486. – Введ. 01.01.2011. – М. : Стандартинформ, 2010. – 29 с.

4. Волокно льняное трепаное длинное. Технические условия : СТБ 1195 – 2008. – Введ. 30.04.2008. – Минск : Госстандарт, 2008. – 19 с.
5. Стекло натриевое жидкое. Технические условия : ГОСТ 13078-81. – Введ. 01.01.1982. – М. : Стандартиформ, 2005. – 14 с.
7. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний : ГОСТ 17177-94. – Введ. 22.08.1995. – Минск : Минстройархитектур, 1996. – 56 с.
8. Давыденко, Н.В. Повышение водостойкости жидкого стекла, применяемого в качестве вяжущего при производстве теплоизоляционных костросоломенных плит / Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. – 2015. – С. 71–75.
9. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М. : Высш. шк., 1988. – 238 с.
10. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
11. Вознесенский, В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К. : Выща шк., 1989. – 328 с.



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОСТЕКЛА

Д.И. Сафончик, М.В. Лыщик

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Беларусь

email: d.Safonchyk@mail.ru

*Приведены некоторые сведения о получении пеностекла, в производстве которого применен доломитовый материал. Проанализированы основные факторы, влияющие на качество пеностекла. Представлены экспериментальные данные подтверждающие, что при использовании доломитовой муки оптимальными параметрами являются те, которые позволяют получить размер пор около 2 мм при достижении средней плотности ниже 300 кг/м<sup>3</sup>. Указанные параметры достигнуты при температуре 830 °С.*

*Ключевые слова: пеностекло, доломит, каменный уголь, поры, тонкость помола.*

## TECHNOLOGICAL ASPECTS OF RECEIPT OF FOAMGLASS

D. Safonchik, V. Lishik

Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus

email: d.Safonchyk@mail.ru

*To the article some information is driven about the receipt of foamglass, dolomite material is applied in the production of that. Basic factors influencing on quality of foamglass are analysed. Experimental data are presented confirmative, that at the use of dolomite flour optimal parameters there are those that allow to get the size of pores an about 2 mm under reaching a middle closeness below 300 kg/m<sup>3</sup>. The indicated parameters are attained at the temperature of 830 °C.*

*Keywords: foamglass, dolomite, anthracite coal, pores, fineness of grade.*

Качество пеностекла как теплоизоляционного материала определяется в первую очередь малым объемным весом, равномерным распределением пор по всему объему и максимально достижимой прочностью при заданном объемном весе [1].

По мнению Шилла Ф. [2] присутствие в пенообразующей смеси воды способствует более равномерному распределению газообразователя. Диспергирование стекол в жидких средах способствует ускорению этого процесса, а также снижает вязкость расплава в области температуры вспенивания пеностекла [3]. Но нет единого мнения о влиянии водяных паров на процесс вспенивания. Автор патента [4] указывает на изменение химизма процесса газообразования в пенообразующей смеси при ее нагревании и изменении скорости пенообразования в жидких средах.

Так, по данным различных исследователей [2;5] продолжительность подогрева пенообразующей смеси сильно различается (от 15 мин до 2-3 ч)[2;5].

Многими авторами в своих работах [1–3] рекомендуется поддерживать температуру спекания ниже температуры вспенивания до тех пор, пока вся масса не только полностью спечется, но и равномерно прогреется. В это время в печи, при использовании углеродсодержащих газообразователей, необходимо поддерживать восстановительную среду, чтобы избежать преждевременного выгорания газообразователя и чрезмерного остекловывания поверхности материала [2; 6]. Для этого можно использовать СО-содержащие дымовые га-

зы [2] или вспенивание производить в плотно закрытых формах. Что для карбонатных газообразователей не является обязательным условием.

Наиболее чувствительным параметром при вспенивании является температура, стабильность которой необходимо поддерживать в момент вспенивания [1]. По данным полученным Шиллом Ф. [2] для того чтобы вспенивание происходило равномерно по всей высоте рекомендуется форму нагревать больше снизу, чем сверху, что вызвано разницей гидростатических давлений столба силикатного расплава по высоте формы.

Согласно исследованиям Демидовича Б.К [1], важным является контролировать скорость подъема температуры до максимального значения с тем условием, чтобы шихта могла полностью прогреться. Также, контролируется скорость остывания, которая условно может делиться на 2 этапа: резкий сброс до температуры около 600 °С и плавное охлаждение до температуры в цеху со скоростью не более 0,7 °С/мин.

По данным автора, приведенным в работе [3], минимальное значение температуры вспенивания лимитируется способностью системы образовывать блочное стекло с объемной плотностью 0,15–0,45 г/см<sup>3</sup>, высшее значение температуры вспенивания ограничивается нарушением однородности пористой структуры стекла и увеличением объемного водонасыщения из-за сплошности стенок пор, объединения их в крупные поры, образования полостей и снижением экономической целесообразности процесса, что приведет к удорожанию готовой продукции.

Многие исследователи приводят различные данные о скорости отжига пеностекла, согласно которым отжиг изделий с одинаковыми размерами осуществляется по характерно отличающимся кривым. Согласно данным Т.Н. Кешишяна [7], пеностекло является материалом с особой неоднородной структурой, содержащим газовую, стекловидную и некоторую долю кристаллической фазы. Это условие в значительной мере осложняет процесс отжига изделий из пеностекла.

Помимо химического состава стекла, вида газообразователя и температурного режима на структуру, а, следовательно, и на свойства пеностекла влияет тонкость помола стекла и газообразователя.

По данным исследований [2], чем меньше размер зерен спекаемого материала, тем равномернее структура пеностекла, тем лучше его качество.

По приведенным данным в работах [1; 2], значения дисперсности ниже 6000 см<sup>2</sup>/г требуют повышенных расходов газообразователя (более 0,35 мас.%) и высоких температур вспенивания (840–860 °С), что приводит к получению блочного пеностекла с повышенной объемной плотностью, а, следовательно, повышенной теплопроводностью. Значения дисперсности в интервале 6000–20000 см<sup>2</sup>/г требуют меньших расходов газообразователя (0,15–0,35 мас.%), более низких температур вспенивания (790–820°С), и обеспечивают получение блочного пеностекла высокого качества с низкой объемной плотностью, и низкими значениями объемного водонасыщения, а следовательно низкой теплопроводностью. Использование стеклообразного щелочного алюмосиликата с дисперсностью более 20000 см<sup>2</sup>/г экономически и технологически нецелесообразно.

Таким образом, производство пеностекла позволяет варьировать качественными и теплофизическими свойствами конечного продукта путем изменения дисперсности сырьевых компонентов и температурно-временных режимов, что в свою очередь делает процесс получения пеностекла более гибким и изменяемым в зависимости от вида исходного сырья и требуемых характеристик конечного продукта.

Ввиду того, что каменный уголь не является характерным сырьем для нашего региона, исследована возможность использования в качестве газообразователей доломитового сырья.

Сохраняя все технологические параметры получения пеностекла с каменным углем проведен эксперимент с заменой каменного угля на доломитовую муку. Полученные образцы представлены на рисунке 1.

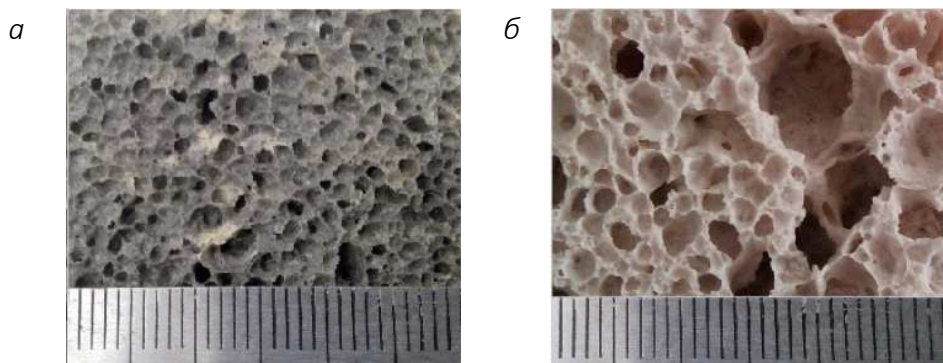


Рисунок 1. – Образцы пеностекла:  
а – с каменным углем ( $\rho=167 \text{ кг/м}^3$ ); б – с доломитовой мукой ( $\rho=258 \text{ кг/м}^3$ )

Анализируя структуру представленных образцов можем сделать вывод, что при использовании доломитовой муки не удастся получить структуру, аналогичную той, что получена с применением каменного угля. Поэтому, необходимо уточнять температурно-временной режим вспенивания и количество газообразователя, необходимого для вспенивания.

Сохраняя количество доломитовой муки, изменяли температуру вспенивания. Структура полученных образцов представлена на рисунке 2.

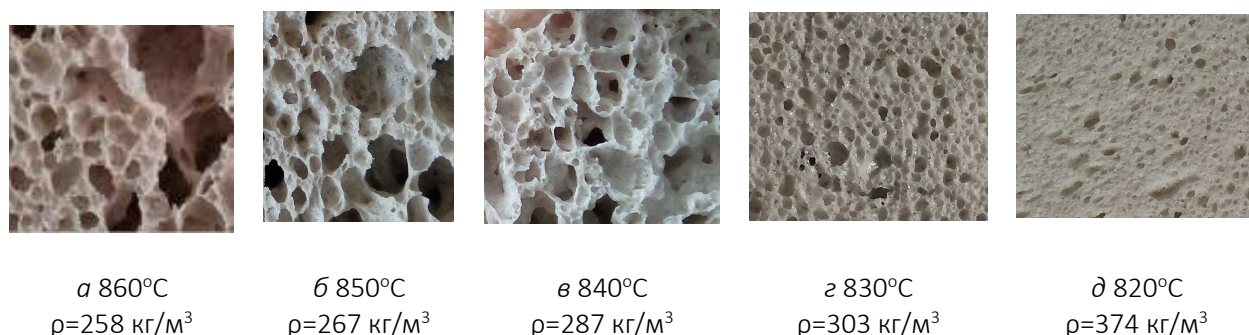


Рисунок 2. – Структура пеностекла с доломитовым газообразователем

Снижая температуру вспенивания с 860°C с шагом 10 °C наблюдаем увеличение плотности образцов. При этом, достигая температуры в 830°C структура материала становится более однородной, по сравнению с другими образцами. Плотность образца, полученного при температуре 820°C, значительно увеличилась по сравнению с образцом, полученным при 830 °C. Поэтому, для дальнейшей работы приняли температуру 830 °C как оптимальную для получения однородной поровой структуры.

Установлено, что для пеностекла с каменным углем равномерность распределения пор, их размеры (2 мм) и плотность материала ( $170 \text{ кг/м}^3$ ) наиболее оптимальны при температуре 860°C. При использовании доломитовой муки получение оптимальных показателей по равномерному распределению пор, их размеру (2 мм) и плотности ( $300 \text{ кг/м}^3$ ) достигается при температуре 830°C.

При выполнении дальнейших исследований установлено, что комбинирование скоростей подъема температуры (при резком подъеме до 600°C, когда стекло ещё не перешло в вязко-пластичное состояние, и замедлении скорости при дальнейшем увеличении температуры) позволяет сокращать продолжительность температурной обработки с 1,5 до 1 ч.

После того, как был установлен температурно-временной режим вспенивания пено-стекла, провели эксперимент по определению оптимального содержания газообразователя в шихте. Для этого вводили различное количество газообразователя (доломитовой муки) при неизменном температурно-временном режиме. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.

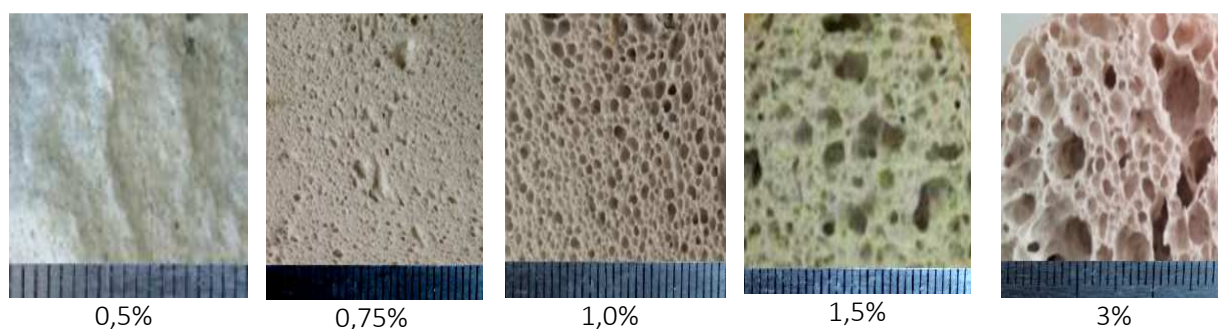


Рисунок 3. – Образцы пеностекла с различным количеством доломитового газообразователя

По рисунку 3 можно сделать вывод о том, что оптимальным количеством газообразователя является 1%, т.к. при этом образуется более однородная структура материала.

При производстве пеностекла основной целью является получение материала с равномерно распределёнными по объёму порами одинакового диаметра. Анализируя структуру полученных образцов, можно сделать вывод, что оптимальным размером для частиц стекла является размер от 3 мкм и меньше. Этому значению соответствует средний размер пор пеностекла 1,9 мм. Средний размер пор пеностекла при большем размере частиц применяемого стекла увеличивается, а поровая структура становится более разнородной.

При анализе полученных данных установлено, что при использовании доломитовой муки оптимальными параметрами являются те, которые позволяют получить размер пор около 2 мм при достижении средней плотности ниже 300 кг/м<sup>3</sup>. Указанных параметров можно достичь при температуре 830 °C и количестве газообразователя 1%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Демидович, Б.К. Пеностекло / Б.К. Демидович. – Минск : Наука и техника, 1975. — 248 с.
2. Шилл, Ф. Пеностекло. Производство и применение / Ф. Шилл. – М. : Стройиздат, 1965. – 307 с.
3. Демидович, Б.К. Производство и применение пеностекла / Б.К. Демидович. – Минск : Наука и техника, 1972. — 304 с.
4. Кешишян, Т.Н. О зависимости механических свойств стекла от его склонности к кристаллизации / Т.Н. Кешишян, М.Б. Эпельбаум // Тр. Моск. хим.-технол. ин-та им. Д.И. Менделеева. – 1959. – Вып. 27. – С. 150–155.
5. Пеностекло : пат. 46335 ГДР, МКИ С 03 С 11/00.
6. Китайгородский, И.И. Стекло и керамика / И.И. Китайгородский. – М. : Гос. изд-во лит. по строит. материалам, 1950. – №4 — С. 3–6.
7. Бутт, Л.М. В сб. «Труды совещания по расширению производства и ассортимента теплоизоляционных и акустических материалов и применению их в строительстве и других отраслях народного хозяйства». – Рига, 1958. – С. 163–175.

## ВОДОСТОЙКОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГИПСОВЫХ ВЯЖУЩИХ

А.С. Катульская, Л.М. Парфёнова

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.katulskaya@psu.by, l.parfenova@psu.by

*Представлены результаты определения физико-механических характеристик модифицированного гипсового вяжущего. Установлено, что применение модификаторов на основе золы «Белорусской ГРЭС» в комплексе с суперпластификатором «Стахемент 2000М Ж30» и акриловой эмульсией «Acrilic 1200» увеличивают прочность и водостойкость гипсовых вяжущих.*

*Ключевые слова: гипсовые вяжущие вещества, суперпластификатор, акриловая эмульсия, водостойкость, коэффициент размягчения.*

## WATER RESISTANCE OF MODIFIED GYPSUM BINDERS

A. Katulskaya, L. Parfenova

Polotsk state university, Belarus

email: a.katulskaya@psu.by, l.parfenova@psu.by

*The results of the determination of the physic-mechanical characteristics of the modified gypsum binder are presented in the article. It has been established that the use of modifiers based on the cinder of the «Belorusskaya GRES» in «Stahement 2000M G30» and acrylic emulsion «Acrilic 1200» increases the strength and water resistance of gypsum binders.*

*Keywords: gypsum binders, superplasticizer, acrylic emulsion, water resistance, coefficient of softening*

Материалы и изделия на основе гипсовых вяжущих активно внедряются на рынке строительных материалов. Гипсовые вяжущие, а также материалы на их основе имеют ряд положительных качеств. Производство гипсовых вяжущих веществ нетоксично, характерен низкий расход топлива и энергии. Материалы на основе гипса имеют хорошие тепло- и звукоизоляционные свойства, огне- и пожаробезопасность, сравнительно низкую плотность и декоративность [1].

В настоящее время выросла популярность использования отделочных материалов, а также сухих строительных смесей на основе гипсовых вяжущих веществ. Одним из недостатков данных отделочных материалов является низкая водостойкость затвердевшего изделия, которая является причиной ограничения использования изделий на основе гипсовых вяжущих во влажной среде [2].

Авторы [3] считают, что адсорбция влаги внутренними поверхностями микрощелей и возникающее при этом расклинивающее действие водных плёнок является причиной снижения прочности гипсового камня при увлажнении. При действии водных плёнок отдельные микроэлементы кристаллической структуры разъединяются. Низкая водостойкость гипсовых вяжущих обусловлена высокой растворимостью дигидрата сульфата кальция, его высокой проницаемостью и расклинивающим действием молекул воды при проникании в межкристаллические полости. Так же дигидрат сульфата кальция характеризует-

ся достаточно большим объёмом межплоскостных пространств, в которые проникает вода, ослабляет связи и растворяет гипс.

В большинстве случаев повышение водостойкости достигается путем модификации строительного гипса различными химическими добавками. В проведённых исследованиях ставилась задача изучения водостойкости модифицированного гипсового вяжущего. Для проведения экспериментальных исследований использовался гипс строительный «Тайфун Мастер» № 35 марки Г- 5 III А производства ООО «Тайфун». В качестве модифицирующих добавок использовались суперпластификатор «Стахемент 2000М Ж30», акриловая эмульсия «Acrilic 1200» в количестве 0,1% от массы гипса. В качестве модификатора так же было принято использовать зольную составляющую золошлаковых отходов «Белорусской ГРЭС» в количестве 5% от массы вяжущего вещества.

Для оценки физико-механических показателей гипсовых вяжущих формовались образцы-балочки размером 4х4х16 см., химические добавки в жидком виде вводились в воду затворения и перемешивались до полного растворения. Испытание образцов проводилось через 2 часа после формования в соответствии с ГОСТ 23789 [4].

После 2 часов выдерживания образцов в условиях комнатной влажности определялась прочность образцов-балочек на прессе гидравлическом марки ПГМ – 500 МГ 4А. Коэффициент размягчения определялся также на образцах-балочках после выдерживания их в воде в течение 2 суток. Коэффициент размягчения гипсового камня рассчитывался как отношение прочности образца после водопоглощения к прочности сухого образца состава 1 без добавок. Результаты проведённых исследований представлены в таблице.

Таблица. – Физико-механические свойства модифицированного гипсового вяжущего

Номер состава	Модифицирующая добавка (% от массы вяжущего)	Сроки схватывания, мин		Прочность, МПа (%)				Коэффициент размягчения
		начало	окончание	на изгиб		на сжатие		
				в сухом состоянии	в водонасыщенном состоянии	в сухом состоянии	в водонасыщенном состоянии	
1	Без добавки (контрольный)	6	15	2,9 (100)	2,7 (100)	5,2 (100)	4,3 (100)	0,82
2	Зола(5%)	4	9	3,6 (124,1)	2,9 (107,4)	5,2 (100)	4,5 (104,6)	0,86
3	Стахемент 2000М Ж30 (0,1%)	6	13	3,1 (106,9)	2,4 (88,9)	6,0 (115,4)	4,7 (109,3)	0,90
4	Acrilic 1200 (0,1%)	3	17	4,2 (144,8)	3,9 (44,4)	7,4 (142,3)	5,2 (120,9)	1,0
5	Зола(5%) + Стахемент 2000М Ж30 (0,1%)	5	9	3,9 (134,5)	2,9 (107,4)	5,4 (103,8)	5,1 (118,6)	0,98
6	Зола(5%) + Acrilic1200 (0,1%)	4	11	3,6 (124,1)	2,6 (96,3)	5,6 (107,7)	5,5 (127,9)	1,1

Анализ полученных результатов показал, что введение суперпластификатора «Стахемент 2000М Ж30» в состав гипсового теста (состав 3) приводит к снижению коэффициента

размягчения на 4,9%, при этом наблюдается уменьшение сроков схватывания. Прочность образцов на изгиб до водопоглощения увеличилась на 6,9% по сравнению с прочностью контрольного состава 1, прочность на сжатие – на 15,4%.

Введение акриловой эмульсии «Acrilic 1200» (состав 4) увеличивает коэффициент размягчения на 9,8% по сравнению с контрольными образцами (состав 1), окончание сроков схватывания отдалается на 2 минуты. Прочность на изгиб и на сжатие увеличивается соответственно на 44,8 и 42,3% по сравнению с контрольными образцами.

Модификация гипсового вяжущего золой и суперпластификатором «Стахемент 2000М Ж30» (состав 5) приводит к увеличению прочности гипсового камня на изгиб на 34,5%, прочности на сжатие – на 3,8%. Коэффициент размягчения образцов увеличился на 17,1% по сравнению с составом 1. Наблюдается сокращение сроков начала и окончания схватывания гипсового вяжущего вещества на 1 и 6 минут соответственно.

Был рассмотрен также вариант модификации гипсового вяжущего добавкой золы и акриловой эмульсии «Acrilic 1200» (состав 6). Данный комплексный модификатор обеспечил увеличение коэффициента размягчения на 19,5% по сравнению с контрольным составом, при этом сроки схватывания сократились. Прочность на сжатие увеличилась на 7,7%, прочность на изгиб – на 24,1%.

Таким образом, применение модификаторов на основе золы «Белорусской ГРЭС» в комплексе с суперпластификатором «Стахемент 2000М Ж30», и акриловой эмульсией «Acrilic 1200» позволяют увеличить прочность до 27 % и водостойкость композиционных гипсовых вяжущих в 1,3 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Манушина, А.С. Влияние добавок на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего / А.С. Манушина, А.М. Ахметжанова, Е.Н. Потапова // Успехи в химии и химической технологии. – Т. XXIX. – № 7. – 2015. – С. 59–61.
2. Сысоев, А.К. Влияние импрегнирования путём поверхностной гидрофобизации на водостойкость гипсовых композитов [Электронный ресурс] / А.К. Сысоев, В.А. Чарухина // Инженерный вестник Дона. – № 2. – 2017.
3. Рецептура водостойких композиционных гипсовых вяжущих с композитами техногенного происхождения / А.Х. Аласханов [и др.] // Вестн. Дагест. гос. техн. ун-та. Сер., Технические науки. – № 4. – 2015. – С. 63–76.
4. Вяжущие гипсовые. Технические условия : ГОСТ 125-79 / Госстрой ССР. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 5 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТИТЕЛЬНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

*А.В. Должнонок, Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович*

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.dalzhonak@psu.by, n.davydenko@psu.by, a.bakatovich@psu.by

*Приведены сведения по применению соломы зерновых культур и костры льна в производстве стеновых строительных материалов. Рассмотрены результаты исследований теплофизических характеристик стеновых материалов на основе заполнителей из соломы и костры льна в климатической камере с анализом полученных графиков распределения температур и влажности по толще материалов.*

*Ключевые слова: стеновые материалы, солома, костра льна, климатическая камера, влажность, растительное сырье.*

## DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF WALL MATERIALS BASED ON PLANT FILLERS IN THE CLIMATE CELL

*A. Dolzhonok, N. Davydenko, A. Bakatovich*

Polotsk State University, Belarus

email: a.dalzhonak@psu.by, n.davydenko@psu.by, a.bakatovich@psu.by

*Information about the use of straw cereals and shove in the production of build-ing wall materials is provided. The results of investigations of thermophysical characteristics of wall materials based on fillers from straw and shove in a climatic cell are examined. The analysis of the obtained temperature and humidity distribution graphs in the thickness of materials is held.*

*Keywords: wall materials, straw, flax, climatic cell, humidity, plant raw material.*

На сегодняшний день одной из основных задач строительства является энергосбережение и обеспечение требуемого сопротивления теплопередаче стеновых конструкций при условии минимизации вредного воздействия на окружающую среду и человека. Истощение природных ресурсов приводит к необходимости использования отходов и вторичных продуктов производства при разработке новой строительной продукции. Отходы растительного происхождения используются для производства строительных материалов на протяжении многих столетий, что обусловлено доступностью данного сырья и его низкой стоимостью. Также материалы на основе растительного сырья характеризуются малой теплопроводностью, низкой плотностью и относительно высокой прочностью. Данные свойства позволяют обеспечить широкий спектр применения растительных отходов в строительной сфере. Наиболее широко из сельскохозяйственных растительных отходов в строительстве применяют солому злаковых культур и костру льна.

В Великобритании спрессованную солому используют для получения экопанелей «Stramit» выдерживающих нагрузку в 1100 кг без деформаций и обладающих теплопроводностью 0,099 Вт/(м·°C) [1]. На основе соломенных тюков производят стеновые панели «Есо-



сосоп» (Литва) и «Экобуд» (Россия) толщиной 400 мм с коэффициентом теплопроводности 0,05–0,065 Вт/(м·°C) [2, 3].

Из дробленой соломы ржи, гречихи с применением цемента изготавливают стеновые блоки прочностью 2–2,5 МПа [4]. Разработана технология производства на основе костры льна гипсосодержащего костробетона плотностью 630–980 кг/м³ с пределом прочности на сжатие 0,8–4,4 МПа [5]. При использовании костры льна в цементных смесях для нейтрализации сахаров используют специальные химические добавки, что обеспечивает прочность стеновых блоков в пределах 0,98–5,4 МПа при плотности 480–735 кг/м³ [6].

Проведены исследования легкого конструкционного материала, представляющего собой смесь соломы с известью или гипсом в Université d'Orléans (Франция) [7, 8]. Определены прочностные и теплофизические характеристики. Результаты испытаний показали, что композит, усиленный волокнами из соломы пшеницы, обладает повышенной прочностью на сжатие.

Солому используют в качестве заполнителя при производстве дешевых строительных материалов для возведения жилья в Египте [9]. Вяжущим компонентом является цемент. Утилизация соломы, путем сжигания, приводит к ухудшению экологической обстановки в регионе, загрязняя окружающую среду. Тепловые испытания показали, что блоки возможно использовать в качестве стеновых и теплоизоляционных материалов.

В процессе эксплуатации зданий количественное содержание влаги в материалах ограждающих конструкций изменяется в зависимости от конструктивных особенностей, свойств материалов, температурно-влажностных условий в помещениях, климатических условий района строительства. Влажностный режим определяет эксплуатационно-технические характеристики ограждающих конструкций здания, в том числе долговечность, а также непосредственно влияет на теплозащитные свойства ограждающих конструкций и энергоэффективность применяемых материалов.

Рассматриваемые в работе результаты исследований связаны с изучением теплофизических характеристик стеновых композиционных материалов на основе соломы, костры льна, цемента и извести. Образцы в виде блоков толщиной 300 мм плотностью 530 кг/м³ помещали между теплым и холодным отделением климатической камеры. Предварительно стеновые материалы выдерживали в климатической камере при заданных температурно-влажностных режимах (табл. 1) в течение 2 недель.

Образцы 3, 4 к началу основной части испытаний имели большую влажность в сравнении с образцами 1, 2.

Таблица 1. – Температурно-влажностные условия в климатической камере

№ образца	Заполнитель	Режим испытаний	Температура воздуха в теплом отделении камеры, t <sub>г</sub> °C	Относительная влажность воздуха в камере, W %	
				теплое отделение	холодное отделение
1	Солома	1	+18	55–65	55–65
2	Солома с кострой льна		+18	55–65	55–65
3	Солома	2	+18	55–65	90–97
4	Солома с кострой льна		+18	55–65	90–97

Во время проведения испытаний, температуру воздуха в теплом отделении камеры поддерживали на постоянном уровне +18°C и относительную влажность воздуха в пределах 55–65%. В холодном отделении камеры температуру изменяли от +20°C до -20°C с шагом 5°C.

Образцы выдерживали на каждом этапе при заданной температуре на протяжении 5 суток. Распределение температур начинали фиксировать при +5°C в холодном отделении климатической камеры. Измерения проводили информационно-измерительным комплексом РТП-16, через каждые 90 секунд. Для определения температур в толще материала (рис.1) каждый образец условно разделяли на 5 участков толщиной по 60 мм. После окончания испытаний получены распределения температур при температурно-влажностных режимах 1 и 2. По полученным данным определены термические сопротивления теплопередаче и коэффициенты теплопроводности образцов (табл. 2).

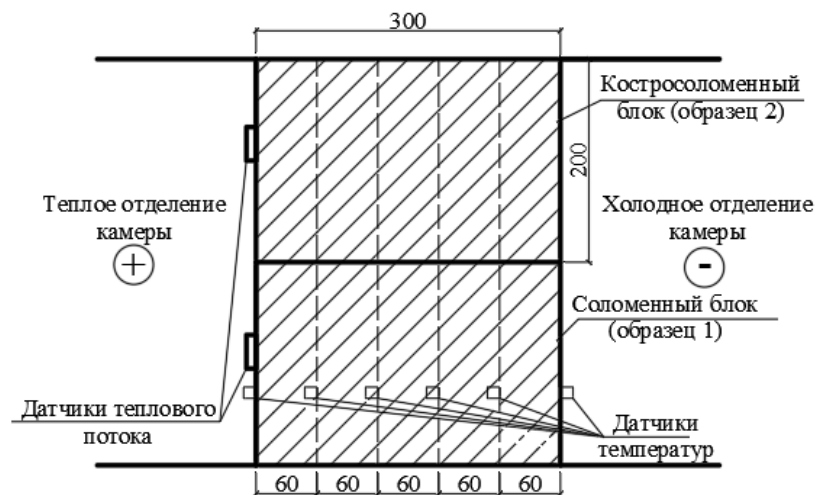


Рисунок 1. – Схема расположения датчиков внутри и на поверхности блоков

Таблица 2. – Теплотехнические характеристики стеновых материалов по результатам эксперимента

Температура воздуха в холодном отделении камеры, °C	Плотность теплового потока Q, Вт/м <sup>2</sup>				Термическое сопротивление теплопередаче R, (м <sup>2</sup> ·°C)/Вт				Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·°C)			
	образец 1	образец 2	образец 3	образец 4	образец 1	образец 2	образец 3	образец 4	образец 1	образец 2	образец 3	образец 4
+5	4,65	4,63	5,0	4,8	2,54	2,85	2,16	2,59	0,118	0,105	0,139	0,116
0	6,23	6,2	6,7	6,4	2,68	3,0	2,22	2,68	0,112	0,1	0,135	0,112
-5	7,3	7,03	7,5	7,1	2,75	3,13	2,27	2,75	0,109	0,096	0,132	0,109
-10	8,76	7,96	9,44	8,04	2,83	3,33	2,31	2,86	0,106	0,09	0,13	0,105
-15	9,76	8,78	10,68	9,01	2,91	3,53	2,34	2,94	0,103	0,085	0,128	0,102
-20	11,5	9,47	12,4	10,4	3,06	3,8	2,4	3,0	0,098	0,079	0,125	0,1

При температуре  $t_x = -20^\circ\text{C}$  в холодном отделении камеры, плотность теплового потока соломенного блока (образец 1) превышает показатель образца 2 на 21%, а образца 3 на 19% в сравнении с характеристикой образца 4. Сравнительный анализ соломенных блоков показал, что плотность теплового потока образца 3 выше на 0,9 Вт/м<sup>2</sup>, чем у образца 1. Значение костросоломенного блока (образец 4) превышает на 10% плотность теплового потока образца 2.

После достижения максимальной отрицательной температуры воздуха  $-20^{\circ}\text{C}$  плотность теплового потока для образцов 1 и 3 возросла в 2,5 раза, а для костросоломенных блоков 2 и 4 значение возросло в 2,1 раза в сравнении с показателями при температуре  $+5^{\circ}\text{C}$  в холодном отделении камеры.

При температуре  $t_x = -20^{\circ}\text{C}$  (режим 1) сопротивление теплопередаче состава 2 превышает нормативный показатель  $3,2 \text{ (м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/Вт}$  на 19%, а на основе соломы (образец 1) не достигает требуемой величины сопротивления теплопередаче. На 25% и 6% более низкие значения сопротивления теплопередаче относительно нормативного показателя зафиксированы у образцов 3 и 4.

Величина термического сопротивления при режиме 1 образца 2 на основе смеси соломы с кострой выше, чем у образца 1 из соломы на 24%, а для режима 2 образец 4 превышает на 25% показатель образца 3 при температуре  $t_x = -20^{\circ}\text{C}$ . Также анализ одинаковых по составу стеновых блоков показал, что термическое сопротивление образца 1 ниже на 19% в сравнении с показателем образца 2, а значение образца 3 меньше характеристики образца 4 на 20%.

При температуре  $+5^{\circ}\text{C}$  в климатической камере значения коэффициентов теплопроводности образцов 2 и 4 ниже на 11% и 17% в сравнении с показателями образцов 1 и 3 соответственно. Коэффициент теплопроводности образца 3 превышает показатель образца 1 на 18%, а образца 4 на 11% в сравнении с показателем образца 2.

При снижении температуры до  $-20^{\circ}\text{C}$  коэффициент теплопроводности образца 1 равен  $0,098 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$ , что на 24% больше значения образца 2. Коэффициент теплопроводности соломенного образца 3 при режиме 2 равен  $0,125 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$ , что превышает показатель костросоломенного образца 4 на 25%.

Коэффициент теплопроводности образца 1 при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$  в холодном отделении камеры уменьшился на 17% и образца 2 на 25%, а для образцов 3 и 4 снижение составило 10% и 14% соответственно относительно показателей при  $+5^{\circ}\text{C}$ .

С понижением температуры в холодном отделении камеры у экспериментальных стеновых блоков наблюдается характерное для эффективных теплоизоляционных материалов постепенное включение в работу проявляющееся в понижении значений коэффициента теплопроводности и повышения сопротивления теплопередаче. Таким образом установленные изменения теплофизических показателей подтверждают, что костросоломенные и соломенные стеновые блоки способны обеспечивать эффективную работу по тепловой изоляции наружных стен.

Основываясь на зафиксированных показателях температур по толще и на поверхности блоков построены графики распределения температур (рис. 2 – 7). При температуре  $+5^{\circ}\text{C}$  амплитуды температур находились в пределах  $9 - 14^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). После снижения температуры в холодном отделении камеры до  $-5^{\circ}\text{C}$  (рис. 4) амплитуда температур образца 2 составляет  $22^{\circ}\text{C}$  и превышает показатель образца 1 на  $2^{\circ}\text{C}$ , а значение образца 4 равно  $18^{\circ}\text{C}$  и на  $2^{\circ}\text{C}$  выше величины образца 3.

При достижении минимальной температуры  $t_x = -20^{\circ}\text{C}$  (рис. 7) амплитуда образца 1 достигла  $32^{\circ}\text{C}$ , а для образца 2 составила  $35^{\circ}\text{C}$  и возросла в 2,3 и 2,5 раза соответственно. Показатели образцов 3 ( $27^{\circ}\text{C}$ ) и 4 ( $31^{\circ}\text{C}$ ) увеличились в 3 и 3,1 раза соответственно относительно амплитуд температур при  $+5^{\circ}\text{C}$ . Амплитуды температур образцов 1 и 2 возросли на 19% и 13% в сравнении со значениями образцов 3 и 4.

Амплитуды температур образцов 1 и 3 при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$  увеличились на 60% и 69% в сравнении с значениями при  $-5^{\circ}\text{C}$ . Увеличение амплитуды образцов 2 и 4 составило 59% и 72% соответственно.

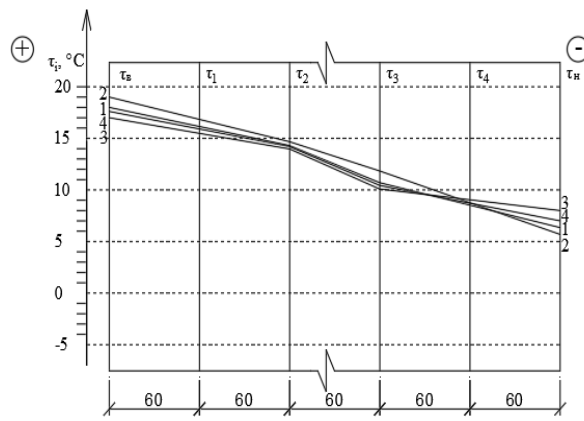


Рисунок 2. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре +5 °C

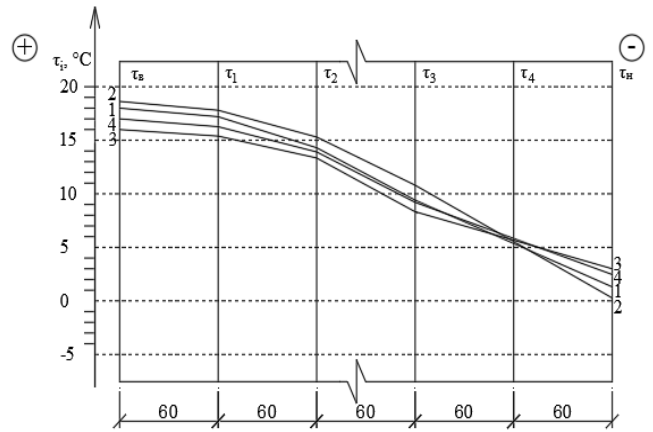


Рисунок 3. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре 0 °C

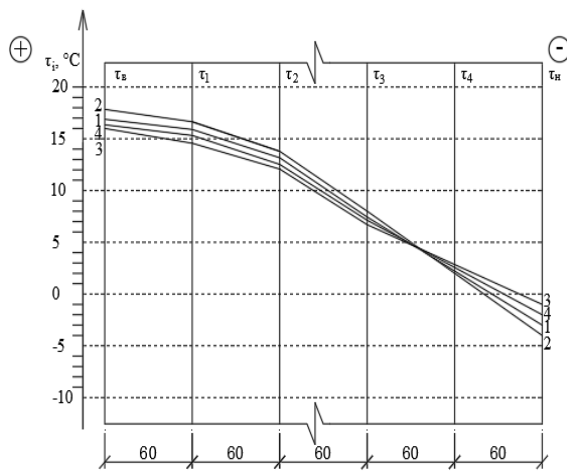


Рисунок 4. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре -5 °C

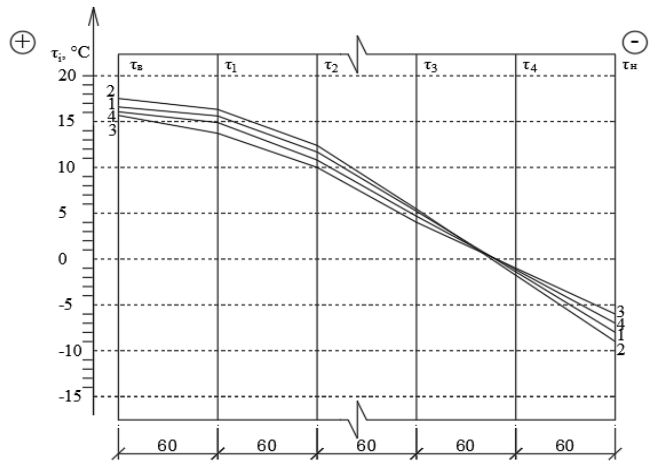


Рисунок 5. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре -10 °C

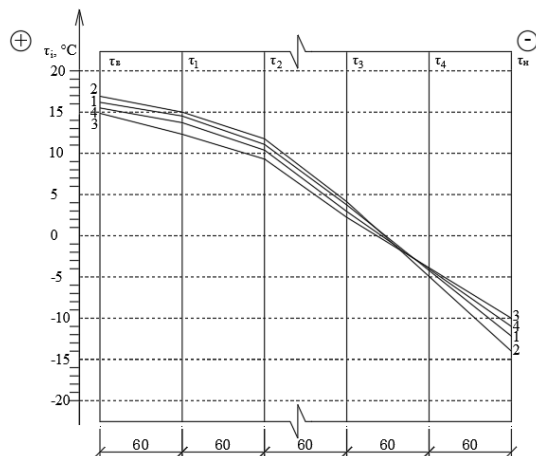


Рисунок 6. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре -15 °C

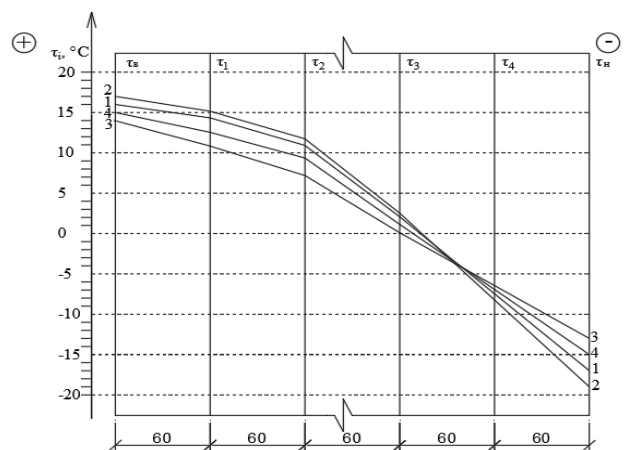


Рисунок 7. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре -20 °C

По окончании исследования в климатической камере определены значения влажности блоков. Сотрудники University of Bath [7] изучали влажность внутри соломенного тюка путем имплантации датчиков внутрь конструкции. При данном методе показатель влажности имеет невысокую точность, так как датчики фиксируют влажность не только материала соломенных тюков, но и воздуха, содержащегося внутри структуры материала, а также внутри просверленных отверстий, куда производилась имплантация датчиков.

Поэтому в исследованиях использован прямой метод определения влажности стенового материала. Из блоков выпиливали образцы размером 100×100×300 мм (рис. 8).

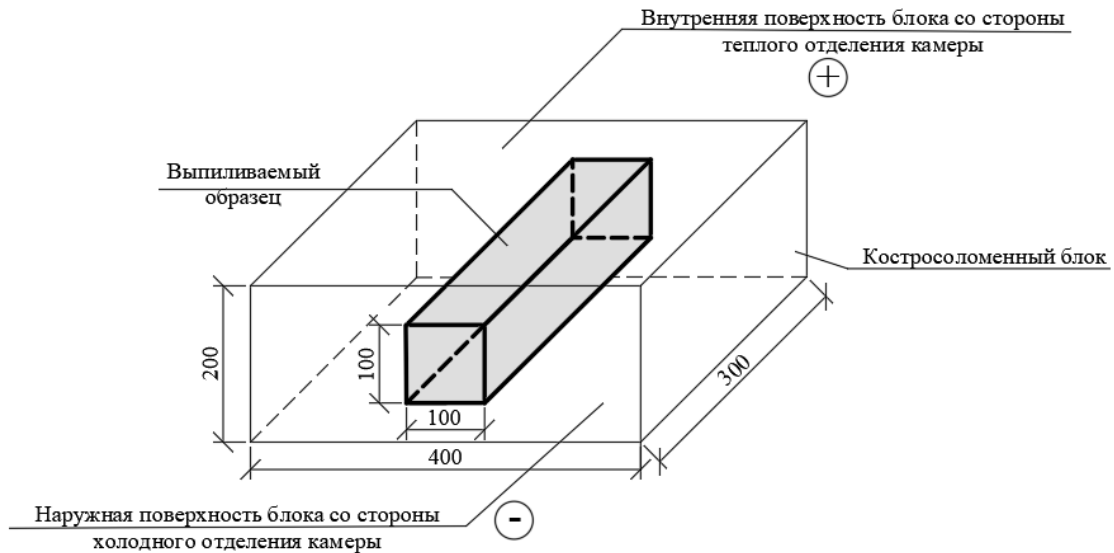


Рисунок 8. – Выпиливаемый образец из стенового блока

Длина выпиленного образца в 300 мм является шириной стенового блока. Полученный образец по длине распиливали поперек на 5 фрагментов. Толщина фрагмента составляла 60 мм. Каждый фрагмент взвешивали, а затем высушивали до постоянной массы и определяли влажность. По полученным данным строили распределения влажности по ширине блоков (рис. 9).

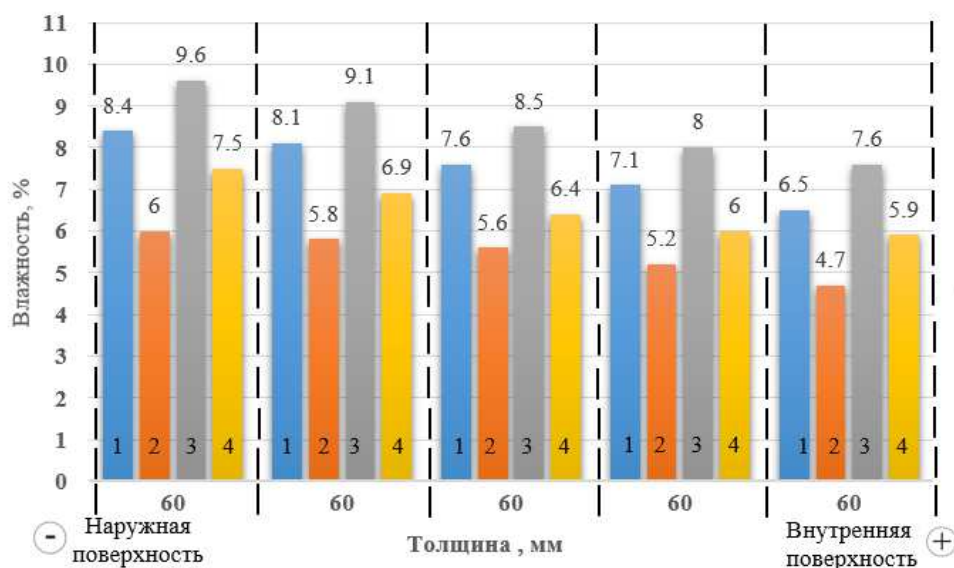


Рисунок 9. – Распределение влажности по толщине стенового материала после испытаний в климатической камере:

1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – образец 4

Среднее значение влажности образца 1 равное 7,5% превышает на 36% показатель влажности образца 2 из смеси соломы и костры равное 5,5%. Для предварительно увлажненных блоков средняя влажность образца 4 составляет 6,5%, что на 24% меньше показателя образца 3.

При сравнении блоков на заполнителе из соломы установлено, что средняя влажность образца 3 достигает 8,6%, что больше на 15% значения состава 1, а показатель образца 4 на основе костросоломенной смеси увеличился на 18% относительно влажности образца 2.

**Выводы.** Изменение относительной влажности воздуха в результате сорбции влаги материалом оказывает значительное влияние на теплофизические показатели исследуемых стеновых блоков. Так при повышении относительной влажности воздуха до 97% и температуре -20°C коэффициент теплопроводности повышается на 28% для блоков из соломы и на 26% для образцов из смеси костры и соломы.

Анализ полученных данных показывает, что при температуре -20°C и влажности воздуха 55 - 65% образцы на заполнителе из смеси соломы и костры льна обладают более высокими теплотехническими характеристиками  $\lambda = 0,079 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ,  $Q = 9,47 \text{ Вт/м}^2$ , что на 19% и 18% ниже показателей стеновых блоков на основе соломы  $\lambda = 0,098 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ,  $Q = 11,5 \text{ Вт/м}^2$ .

При температуре 1 сопротивление теплопередаче блоков из смеси соломы и костры превышает нормативный показатель на 19%, а на основе соломы показывают результат ниже нормативного сопротивления теплопередаче. В условиях 97% влажности воздуха сопротивление теплопередаче блоков на заполнителе из соломы на 20% ниже показателя образца из смеси соломы и костры равного 3 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ .

По результатам испытаний в климатической камере при режиме 1  $t_x = -20^\circ\text{C}$  амплитуда температур образца 2 достигла 35°C, что на 9% больше показателя образца 1. Для образца 4 при амплитуде 31°C превышение над образцом 3 составило 15%. Повышение относительной влажности в холодном отделении климатической камеры (режим 2) отрицательно влияет на амплитуду температур стеновых блоков и вызывает снижение показателей для образцов на заполнителе из соломы на 19%, а для составов из смеси костры и соломы на 13%.

Повышение влажности блоков из соломы на 32 – 36% (при режимах 1 и 2) относительно показателей блоков на основе композиции из смеси соломы и костры льна объясняется большей величиной сорбционной влажности дробленой соломы по сравнению с кострой льна. По этой же причине соломенные блоки насыщаются влагой с большей скоростью, что подтверждается результатами исследования сорбционной влажности дробленой соломы и костры льна.

Полученные результаты испытаний в климатической камере подтверждают, что стеновые блоки на основе соломы и костры льна выполняют не только функцию стенового ограждения, воспринимающего нагрузку, но и одновременно обеспечивают высокие теплоизолирующие свойства наружных стен.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Энергоэффективное строительство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://straw.z42.ru/node/449>. – Дата доступа: 25.09.2017.
2. Производство и строительство каркасных домов из соломенных панелей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eco-bud.com/>. – Дата доступа: 25.07.2016.

3. Соломенные щиты «Ecosocoon» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecosocoon.lt/russian/>. – Дата доступа: 26.09.2017.
4. Стеновые облегченные блоки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spinel73.ru/bloki.php>. – Дата доступа: 02.10.2017.
5. Гаврикова, Т.А. Совершенствование технологии малоэтажного монолитного домостроения из костробретона : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08 / Т.А. Гаврикова. – Н. Новгород, 2006. – 12 с.
6. Лобанова, А.В. Стеновые изделия из арболита на основе костры льна / А.В. Лобанова, И.Э. Казимагомедов // Коммунальное хозяйство міст. – 2015. – № 124. – С. 18–20.
7. Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications / M. Bouasker [et al.] // Materials. – 2014. – № 7. – P. 3034–3048.
8. Thermo-mechanical behaviour of an innovative straw lime composite for thermal insulation applications / N. Belayachi [et al.] // Applied. Mechan. and Mat. – 2013. – № 390. – P. 542–546.
9. Mansour, A. Development of straw-cement composite sustainable building material for low-cost housing in Egypt / A. Mansour, J. Srebric, J. Burley // J Appl Sci Res. – 2007. – № 3. – P. 1571–1580.

## КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ВНУТРИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕД ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

В.И. Зубцов, Д.Н. Шабанов, А.Н. Ягубкин, Д.Х. Фарран

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: v.zubcov@psu.by, d.shabanov@psu.by, a.yagubkin@psu.by

*Пьезопреобразователи предназначены для решения сложной научно-технической задачи: контроля и исследования напряжённого состояния внутри деформируемых сред. Проведена проверка работоспособности пьезопреобразователей при натурных измерениях механических напряжений внутри образцов материалов. Рассмотрен принцип работы преобразователей и приведены результаты экспериментальных исследований.*

*Ключевые слова: преобразователь; пьезоэлектрический эффект; механические напряжения; деформируемая среда; характеристика выхода; контролируемая среда; калибровки; электрическое поле.*

## THE CONTROL OF MECHANICAL STRESSES INSIDE DEFORMABLE MEDIA BY PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS

V. Zubcov, D. Shabanov, A. Yagubkin, J. Farran

Polotsk State University, Belarus

email: v.zubcov@psu.by, d.shabanov@psu.by, a.yagubkin@psu.by

*Piezoelectric transducers are designed to solve a complex scientific and technical problem: control and investigation of a stressed state within deformable media. The performance of piezoelectric transducers was carried out and checked in the field measurements of mechanical stresses inside specimens of materials. The principle of operation of transducers is considered and the results of experimental studies are presented.*

*Keywords: transducer; piezoelectric effect; mechanical stresses; deformable medium; output characteristic; controlled environment; calibration; electric field.*

**Introduction.** The application of widely used ultrasonic methods and the traditional method of stress state control through glued strain gages, gives generalized information about the magnitude and nature of the distribution of mechanical stresses along the cross section of the monitoring object, and this is inadequate for practical purposes. The main purpose of piezoelectric transducers for controlling mechanical stresses inside deformable media is to convert measurement information about the stressed state of the object, as a rule, under the influence of interfering factors. Piezoelectric transducers realize the method of measuring mechanical stresses inside deformable media with higher reliability than strain gages, thanks to the original designs that make it possible to exclude the acoustic interaction of the converter with the controlled environment into which it is placed [1].

The relationship between the mechanical loading of piezoelectrics and the resulting electric field strength, which is used in the technique of measuring variable pressures and forces using the piezoelectric effect [2], cannot be used to determine the constant pressures, forces,



since the resulting charge as a result of the piezoelectric effect rapidly flows. To eliminate this phenomenon, an auxiliary piezoelectric element is used to excite dynamic oscillations in the second piezoelectric element [3]. But transducers constructed by this method cannot be used to measure mechanical stresses inside solid continuous media, since when the piezoelectric element is excited in the converter, the latter changes its dimensions, and the environment will prevent it. In order for the piezoelectric transducer not to change its dimensions when the reverse piezoelectric effect is excited in the medium, and therefore the non-appearance of an electrical signal in the output circuit in the absence of a load, an additional piezoelectric element is applied. Moreover, in the two-layer transducer, the main, auxiliary and additional piezoelements are arranged in a column and, in addition, the main one - inside the auxiliary made in the form of a ring [1]. Based on this principle, piezoelectric converters PPMN-1, PPMN -2, PPMN-3 and PPMN -4 were developed.

**Principle of operation of piezoelectric transducers.** Schematically, such piezoelectric transducers can be represented in the form of 2 piezoelements (figure 1): the first lower is electrically excited and forces the upper to oscillate, which is excited by the measured component of the mechanical stress [3].

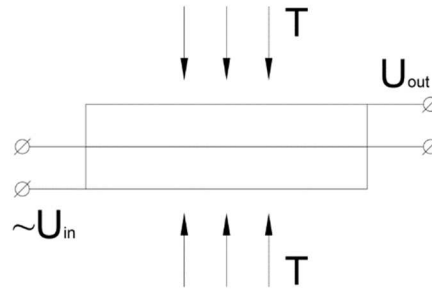


Figure 1. – Scheme of the operation of the piezoelectric transducer:  
T – mechanical stress (input value of the converter)

$\sim U_{in}$  – input excitation voltage;  $U_{out}$  – output voltage (transducer output);  
These processes are described by the equations of the piezoelectric effect:

$$\begin{aligned} P^E &= dT + \varepsilon^T E \\ S^T &= d_t E + s^E T \end{aligned} \quad (1)$$

Equations (1) in this case will have the form:

$$\begin{aligned} P_i &= d_{ij} \cdot T_j \\ S_j &= d_{tij} \cdot E_i \end{aligned} \quad (2)$$

where  $P^E$ ,  $S^T$  – respectively, the polarization measured at a constant electric field E and the deformation measured at a constant mechanical stress T.

$\varepsilon$  – the dielectric constant;

s – elastic compliance.

Indexes  $ij$  – take the following values:

$i=1-3; j=1-6;$

$t$  – matrix transposition;

The first expression of the system of equations (2) characterizes the operation of a piezoelectric element excited by a mechanical stress. The second is the work of a piezoelectric element excited by an electric field.

Under the influence of mechanical stress on the piezoelectric element, its amplitude of dynamic oscillations changes, and hence the magnitude of the electrical voltage  $U_{out}$  at the output electrodes, by the change of which the magnitude of the measured mechanical stress is judged. The mechanical stress is applied to the body, where the sensitive piezoelectric element is placed [1,4]. In addition, these transducers are of parametric type transducers that require additional energy from an external source, in this case – a source of an electric alternating voltage  $U_v$ , modulated by the resistance of the piezoelectric, which varies under the influence of the measured quantity.

Transducers are devices for displaying information about the state of stress in a studied object. Any transducer (sensor) can be considered as a sequential chain of data collection, processing, storage and transmission, which is necessary to control any process.

From the physical concepts of measurement, it follows that for the transformation of the measured physical quantity, certain energy consumption are required. In the piezoelectric transducers considered here, the transmission of information is accomplished by additional expenditure of energy from an external source.

Figure 2 expresses the principle of the piezoelectric transducer of mechanical stresses (PPMN).

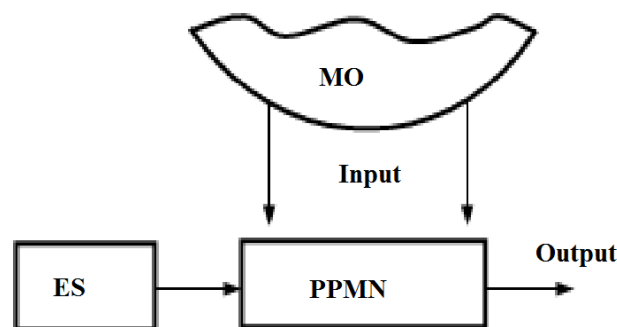


Figure 2. – Scheme explaining the operation of the PPMN:  
ES – energy source; PPMN – mechanical stress of piezoelectric transducer;  
MO – measurement object

To convert the measured value, the PPMN is supplied with an external energy source (ES), which is an oscillator. The energy flow received from the ES is used to transport the measurement information received from the measurement object (MO) to the output of the sensor and recorded by a voltmeter in the form of an alternating electric voltage. In this case, the resistance of the sensor changes and the external energy flux is modulated by the input value, i.e. mechanical stress from the MO. The flow of energy coming from the ES and the information flow from the MO are not only unequal, but also are in different directions.

Indeed, in order to detect, for example, an object using a photo-sensor, a certain flux of light energy must be directed from it to the ES; only the reflected part of the total stream directed to the object will be fixed by this photo-sensor.

Similarly, it is possible to treat the phenomena occurring in the PPMN. In this case, the change in mechanical stresses affects the change in the resistance of the converter, where we

cannot detect these voltages until we "illuminate" our transducer, and pass through it the flow of energy from the ES.

The energy flow from the ES is much larger than the information flow from the MO, and the level of the measured mechanical stress is determined by the ratio of the intensity of the information flow from the MO to the intensity of the information flow from the ES.

Figure 3 shows the dependence of the output characteristics of one of the piezoelectric transducer samples on the energy received by the transducer from the ES, that is, on the magnitude of the exciting voltage transducer  $U_{exc}$  from the oscillator (see Fig. 4). At researches, as sensitive elements of gages piezo-ceramics of type TTS - 19 was used.

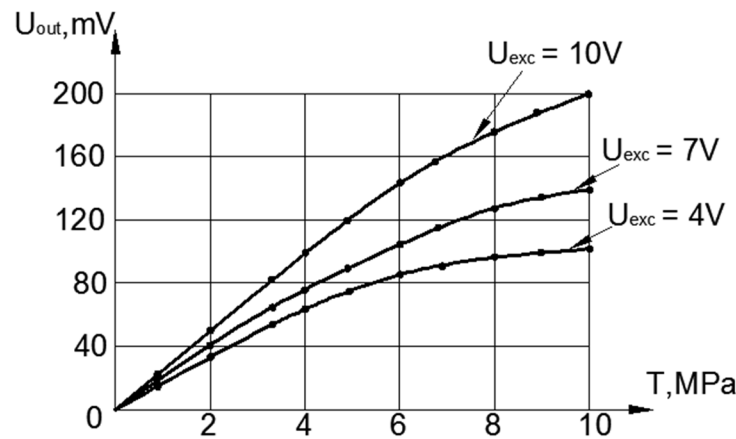


Figure 3. – Dependence of the output characteristics of the piezoelectric transducer of mechanical stresses on the value of  $U_v$

From the analysis of the characteristics, it follows that as  $U_v$  increases, the slope (conversion coefficient) increases, i.e. sensitivity of the converter.

$$S = \frac{dU_{out}}{dT},$$

where  $dU_{out}$  – change in the output value of the transducer;

$dT$  – change in the input (mechanical stress).

In other words, the more energy is consumed by the ES in comparison with the level of interference, the more this information energy can be transferred and the higher the output signal level  $U_{out}$  is.

Thus, the transfer of information to the PPMN is explained as follows. The carrier of the measuring information is energy. To create information on the input of the measuring channel of the mechanical stress transducer, which could then be transmitted further, it is necessary to expend energy. The higher the voltage level from the ES, that is,  $U_{in}$ , the more information can be transferred and the higher the output level  $U_{out}$  is.

Measurements must be interpreted by some data in such a way as to ensure stability and, if possible, close the conditions of the stressed state of the PPMN in calibration and in full-scale measurements. For the interpretation of the measured mechanical stresses within the controlled materials, the calibration data obtained with the uniaxial loading of the PPMN were used. The scheme for measuring the mechanical stresses is shown in figure 4.

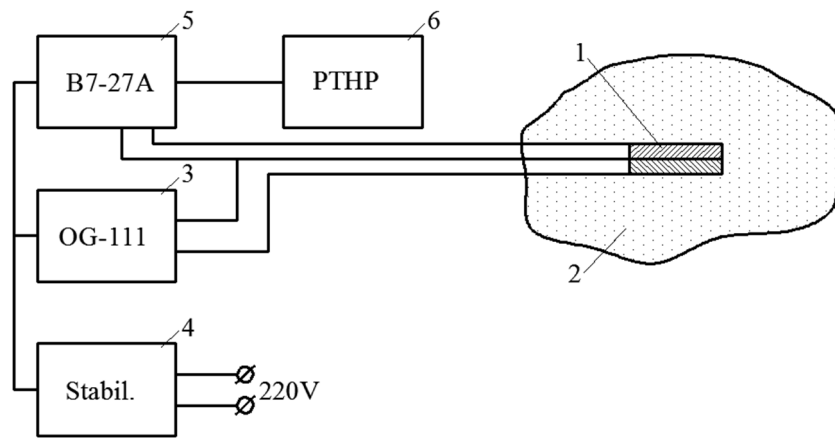


Figure 4. –Scheme of measurement of mechanical stresses:  
1 – piezoelectric transducer; 2 – controlled environment; 3 – oscillation generator;  
4 – voltage regulator; 5 – digital voltmeter; 6 – PTHP

**Calibration of the piezoelectric transducer of mechanical stresses.** The scheme of the calibration apparatus is given in [5] and is analogous to the scheme in Fig. 4; with the only difference being, that instead of the controlled environment, a mechanical loading device is used in the calibration apparatus.

The PPMNs were placed in the loading device and subjected to an uniaxial loading between the steel gaskets, which were carried out in stages at a temperature of  $t=20^{\circ}\text{C}$ .

Before the start of calibration, a time delay is necessary because of the same and stable temperature conditions of the internal parts of the PPMN and the instruments. It is taken equal to 30 minutes. The power is supplied from the generator, the output signal of the PPMN - to a digital voltmeter. The power supply of the generator and voltmeter is stable. A frequency counter is used to control the oscillation frequency of the converter output signal. The calibration consists of six consecutive cycles, each of which consists in increasing the value of the load device from 0 to 100% in steps through 20% and in decreasing the value of the load by the same steps and is used for metrological studies of the PPMN, which are summarized in [6]. Dependences of the output signal on loading and unloading of the graduated PPMN are entered in a computer, coupled with a voltmeter B7-27A with the help of a developed matching device. The real function of the transformation of the PPMN will be nonlinear. The physical meaning of this non-linearity is the change in the sensitivity of the PPMN when the measured value changes. To estimate the errors in the indications of the PPMN associated with the nonlinearity of its transformation, the approximation of the actual transformation function by a straight line segment is most often used. In this case, the problem of carrying out an approximating line through a series of experimental points can be successfully solved, for example, by the method of least squares.

According to the obtained experimental data, the average values of the output value are determined under loading and unloading in Table 1. These data are then used to calculate the PPMN errors with respect to the approximating linear relationship function, which includes the actual values of the physical quantity. The equation of this approximating function in the general case has the form:

$$U = AT + B, \text{ or in the notation of a rectangular coordinate system - } Y = AX + B.$$

Here coefficients A and B are functions of the input quantity and other influencing factors. From the point of view of the effect on the resulting measurement accuracy, A – represents the sensitivity of the sensor sensitivity, B – the error of zero, U – the electrical voltage (output value of the PPMN), T – the mechanical stress (input value). In other words, from the experimental values of the input and output values, the sensitivity of the sensor A is calculated, which is the tangent of the slope of the approximating line to the abscissa axis and a constant value of B, which is the ordinate of the point of intersection of this line with the coordinate axis.

Further, taking into account normative documents [6], the following parameters of sensor error are determined:

$\Delta c$  – systematic component;

$\tilde{\sigma}$  – root-mean-square deviation of the random component;

b – variation of the output signal;

$\delta$  – relative error.

Table 1. – Measuring and calculation data obtained with the calibration of piezoelectric transducers by uniaxial loading

Load device readings, MPa	Output voltage of the converters (arithmetic mean values of six measurements), V				Calibration mode U (f, Hz)	Angular coefficient (sensitivity) SR, mV / MPa	Transducer type
	Loading		Unloading				
	experiment	calculation	experiment	calculation			
0	0,998	0,998	0,990	0,999	10; (800)	8	PPMN-2
2,15	1,017	1,013	1,026	1,023	10; (800)	11	PPMN-4
4,30	1,038	1,028	1,045	1,036			
6,45	1,054	1,044	1,060	1,05			
8,0	1,062	1,059	1,071	1,063			
0	1,995	1,993	1,990	1,986			
2,15	1,025	1,021	1,023	1,020			
4,30	1,050	1,042	1,051	1,049			
6,45	1,068	1,064	1,060	1,059			
8,0	1,086	1,080	1,081	1,078			

Checking the performance of piezoelectric transducers for in-situ measurements of mechanical stresses within specimens of materials

The control of the stress state along the cross section of the object, that is, inside the materials, must be carried out by direct measurement of mechanical stresses by special transducers, which provide accuracy sufficient for practical purposes [6].

The solution of such problems is greatly simplified when there are experimental data obtained as a result of static testing of samples of materials.

The stress transducer was pressed into the polymer material by means of a heating device. After the shrinkage of polyethylene within 24 hours and measurement of internal stresses, it was subjected to mechanical loading, and more about this is to be stated below. When the sample cools as a result of shrinkage, for example in polyethylene, due to the uneven cooling and due to the linear expansion coefficient of the transducer and medium, the internal stresses T appear in the latter. The magnitude of these stresses is determined experimentally by comparing

the transducer's readings with the calibration of the transducer's readings determined after shrinkage. Tests were subjected to 2 grades of composite compositions (Table 2).

Table 2. – Properties of materials

Notation of composition designation	A	B
Composition	Polyethylene of high pressure (PTHP) – 85% Fiberglass (FG) – 10% Talc – 5%	PTHP – 90% FG – 10%
Density, g/cm <sup>3</sup>	1,0378	1,0387

The results of testing transducers in compositions A and B, the physical and mechanical properties of which are given in Table 2, are given in figure 5 and 6.

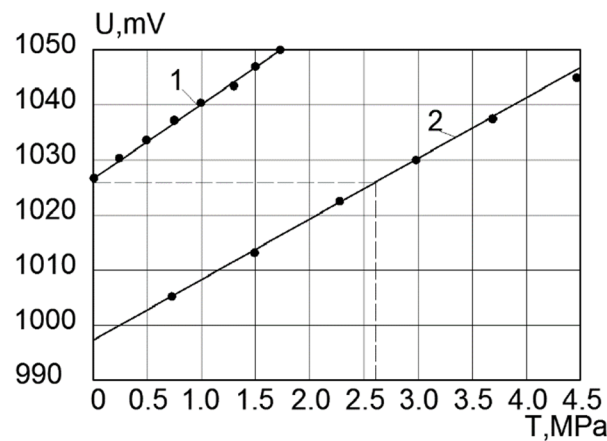


Figure 5. – Readings of the piezoelectric transducer PPMN-2 under uniaxial loading:  
1 – in material A; 2 – between steel gaskets (calibration characteristic, load)

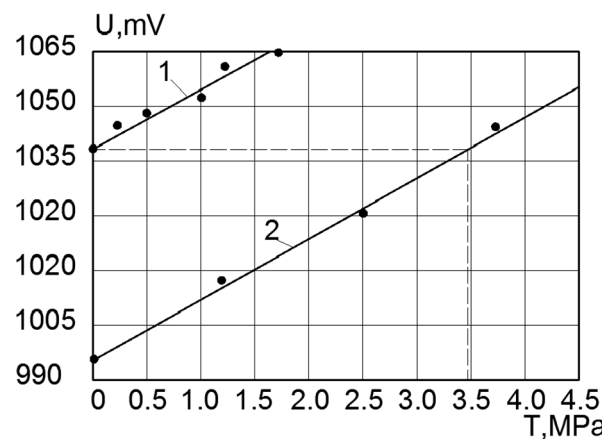


Figure 6. – Readings of piezoelectric transducer PPMN-4 under uniaxial loading:  
1 – in the material B; 2 – between steel gaskets (calibration characteristic, load)

To assess the impact of the interaction of the PPMN with composite materials, as well as measurement of internal stresses in the samples of these materials, the same measuring instruments as for the calibration were used. The measurement scheme is shown in Fig. 4. To measure the PPN, the diameter and height of the sample of the material of a cylindrical shape were

pressed into the sample, respectively, 50 mm and 20 mm, made up of disks, figure 7. For this purpose, a hole, equal to the diameter of the converter, was drilled in one of the discs. On the surface of the disk, grooves were cut out, in which the converter's terminals were laid and fixed.

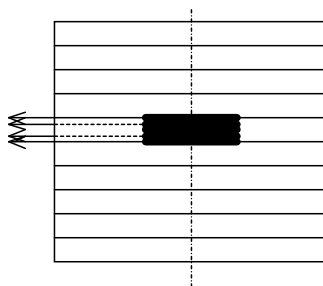


Figure 7. – Diagram showing a prism of disks

On the transducer installed in the disk, we placed more polymer discs from below and above. The formed cylinder of 10 disks was fastened (fixed) with a heated electric soldering iron and was wrapped with thin and dense paper along the entire generatrix to prevent adhesion to the walls of the heating device when the polymer melted. To press the transducers into the samples the of the studied materials, to measure internal stresses in them, a heating device was made, Fig. 8.

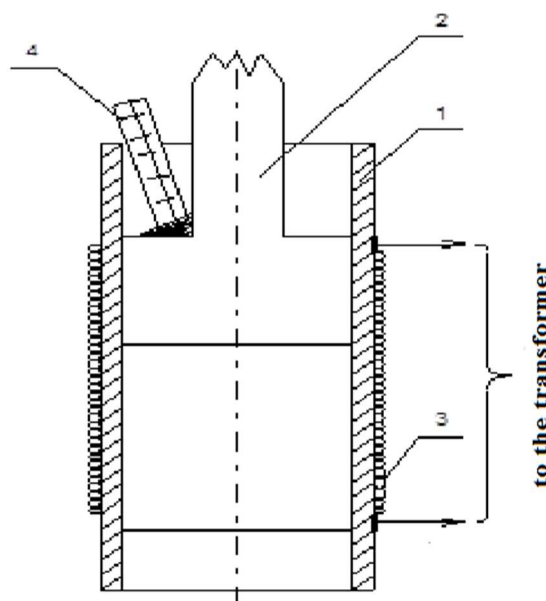


Figure 8. – Diagram showing the heating device

The device is a matrix in the form of a metal hollow cylinder 1 with external and internal diameters, respectively, 61 mm and 51 mm, a height of 150 mm and a punch 2. On the outside of the matrix, an electrical spiral 3 is wound through the insulating liner to heat the cylinder with an electric current controlled by laboratory transformer.

The inner surface of the matrix and the outer surface of the punch adjoining it must be ground and densely joined to each other. The temperature is monitored by a mercury thermometer 4 with a scale up to 300°C, which is placed in the gap formed by the handle of the punch and the inner surface of the cylinder, Fig. 6. The thermometer was attached to the surface by Wood's alloy.

Due to the experimentally selected heating regimes (temperature, heating time and pressure, respectively, 175°C, 30 min and 0.3 MPa), a sample with a measuring PPMN placed in the cylinder after melting and solidification had a continuous structure without shells. As a result, the transducer, after shrinkage of the polymer for 24 hours, was densely pressed. Then it was connected to the measuring circuit in Fig. 4, after which the readings of the digital voltmeter B7-27 were taken. When the sample cools as a result of the shrinkage of the polymer, due to uneven cooling and the linear expansion coefficient of PPN and the medium, internal stresses  $T$  appear in the latter.

According to the calibration characteristic, the internal stresses arising in the polymer sample were determined. For example, in Fig. 5, the voltmeter reads 1026 mV, taken from the pressurized controlled medium of PPMN, which corresponds to 2.65 MPa. This is the internal tension in this environment.

The loading of the PPMN in the sample of the material monitored by it was carried out in order to determine the distortions of the controlled stresses introduced by the PPMN, as by foreign inclusion. The magnitude of the distortion coefficient depends on the ratio of the moduli of elasticity of the medium and the sensor [5].

The requirements for PPMN are formed depending on the type of environment into which it is placed: it is desirable that the modulus of elasticity is the same as the modulus of elasticity of the environment. However, if the modulus of elasticity of the medium changes under the influence of mechanical stresses, the accuracy of the sensor will be less if its rigidity is maintained approximately the same as the rigidity of the medium.

To this end, piezoelectric transducers of static mechanical stresses of the type PPMN have been developed, the elastic moduli of which are in a wide range ( $5 \cdot 10^3 \div 10^5$  MPa). This makes it possible to use a specific modification of the PPMN depending on the rigidity of the monitored object, in order to increase the accuracy of the measurements, since it is known that the closer the controlled medium and the PPMN placed in it are in terms of rigidity, the more accurate the measurement is [5].

The output characteristics of the transducer and the transducer placed inside the polymer sample under loading differ, firstly, by the steepness by the amount of the distortion factor of the stresses caused by the transducer as a foreign inclusion, and secondly by the displacement of zero (the beginning of the characteristic) by an amount internal stresses, Fig. 5.6

**Conclusions.** To interpret the mechanical stresses inside the controlled materials and products from them, measured by the developed piezoelectric transducers, a calibration characteristic obtained by uniaxial mechanical loading was used.

Distortions of measured mechanical stresses by piezoelectric transducers placed inside the medium, like foreign inclusions, are accounted for by applying a particular type of piezoelectric converter, depending on the rigidity of the controlled medium.

A further line of research will be the use of such sensors in building materials and structures [7-9], and also in order to intensify the introduction of BIM-technologies in the Republic of Belarus.

## REFERENCES

1. Zubtsov, V.I. Piezoelectric strength control / V.I. Zubtsov. – Novopolotsk : Polotsk State University, 1999. – 147 p.
2. Osadchiy, E.P. Designing sensors for measuring mechanical quantities / E.P. Osadchiy – M. : Mechanical Engineering, 1979. – 579 p.



3. Trofimov, A.I. Piezoelectric transducers of static loads / A.I. Trofimov. – M. : Mechanical Engineering, 1979. – 128 p.
4. Zibtsov, V.I. Piezoelectric device for monitoring a stressed state / V.I. Zibtsov // Control. Diagnostics. – 1999. – № 12. – P. 29–31.
5. Samal, O.Yu. Stress in concrete, forecasting of technical resources in concrete and reinforced concrete structures and structures / O.Yu. Samal. – Tallinn : Valgus, 1980. – 203 p.
6. Zibtsov, V.I. Method of calibration and metrological studies of piezoelectric sensors of mechanical stresses / V.I. Zibtsov // Instruments and systems. Management, Control, Diagnostics. – 2002. – No. 12. – P. 38–40.
7. Dolzhonok, A. Vegetable wastes for the production of effective wall materials / A. Dolzhonok, N. Davydenko, A. Bakatovich // Geodesy, cartography, cadastre, GIS – problems and development prospects : materials of the international scientific and technical conference, Novopolotsk, June 9–10, 2016 : in 2 parts / Polotsk State University, 2016. – Part 2. – P. 132–137.
- Parfenova, L.M. Operational properties of masonry cement-lime mortars with a limestone slurry filler / L.M. Parfenova, Yu.V. Vishnyakova, A.S. Katulskaya // Vestnik of Polotsk state university. Series F, Construction. Applied Science. – No. 8. – 2017. – P. 67–71.
- Lazarenko, O.V. Application of carbonate-containing slurry of chemical water treatment in composite binder for self-compacting concrete / O.V. Lazarenko, N.L. Shpilevskaya // Vestnik of Polotsk state university. Series F, Applied sciences. Building. – 2016. – P. 55–62.

## МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АРБОЛИТ С НАПРАВЛЕННОЙ УКЛАДКОЙ ЗАПОЛНИТЕЛЯ КАК СТЕНОВОЙ ТЕПЛОВОЙ АККУМУЛЯТОР

А.Н. Ягубкин

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.yagubkin@psu.by

*Приведено теоретическое обоснование снижения теплопроводности арболита с направленной укладкой заполнителя по сравнению с традиционным арболитом. Для этого использована электротепловая аналогия по теории Максвелла-Бургена и вытекающая из нее формула Рэлея-Оделевского. Результаты подтверждены экспериментальными исследованиями. Выполнены также теплотехнический расчет и расчет сопротивлению паропрооницанию, которые подтвердили эффективность направленной укладки заполнителя в арболите. Приведены данные подтверждающие способность арболита выполнять роль стенового теплового аккумулятора.*

*Ключевые слова: арболит, направленная укладка заполнителя, теплопроводность, теплоемкость, стеновой тепловой аккумулятор.*

## MODIFIED ARBOLITH WITH DIRECTED INSTALLATION FILLER AS A WALL HEAT ACCUMULATOR

A. Yagubkin

Polotsk state university, Belarus

email: a.yagubkin@psu.by

*The theoretical basis for reducing the thermal conductivity of the arbolit with the directed packing of the aggregate in comparison with the traditional arbolit is given in the article. For this, an electrothermal analogy was used in the Maxwell-Burgen theory and the Rayleigh-Odelevsky formula derived from it. The results are confirmed by experimental studies. Thermotechnical calculation and calculation of the resistance to vapor permeation have also been performed, which confirmed the efficiency of the directed laying of the aggregate in the arbolit. The data confirming the ability of the arbolit to perform the role of a wall heat accumulator.*

*Keywords: arbolit, directional packing of aggregate, thermal conductivity, heat capacity, wall heat accumulator.*

**Введение.** Для строительной отрасли Республики Беларусь одной из приоритетных является задача увеличения объёмов индивидуального жилищного строительства и обеспечения снижения его стоимости. Перспективным направлением в решении данной задачи может быть организация производства стеновых материалов из арболита с заданными свойствами, получаемого по новой технологии с использованием доступного местного сырья.

В условиях современного строительного производства при организации производства строительных материалов стоит задача совершенствования технологии их изготовле-

ния, обеспечения высоких темпов производства при низких энергозатратах, использования современных методов управления производством (самоактуализационный менеджмент), создания новых конкурентных преимуществ, использования новых методов продвижения товара на рынке (эмпирический маркетинг), использования только местного сырья и оборудования при производстве.

Изделия из арболита отличаются не только невысокой себестоимостью, но и обеспечивают сравнительно высокие темпы строительства с минимальным использованием грузоподъемной техники, при этом возможно обеспечить низкие теплотери через ограждающие конструкции.

**Основная часть.** При направленной укладке, благодаря анизотропным свойствам древесины, вертикальное расположение древесного заполнителя позволит снизить теплопроводность арболита.

Теоретически это можно обосновать, основываясь на электротепловой аналогии по теории Максвелла-Бургена и вытекающей из нее формулы Рэлея-Одеlevского [1, 2]:

$$\lambda = K_1 \lambda_1 \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 - 2\phi(\lambda_1 - \lambda_2)}{2\lambda_1 + \lambda_2 + \phi(\lambda_1 - \lambda_2)}, \quad (1)$$

где  $\lambda$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – соответственно коэффициенты теплопроводности дисперсной системы, дисперсной среды и дисперсной фазы ( $\lambda_1 = 0,87$  Вт/м·°С – теплопроводность цементного камня с учетом открытых и закрытых пор [1];  $\lambda_2 = 0,18$  Вт/м·°С – древесный заполнитель при горизонтальной ориентации [3],  $\lambda_1 = 0,09$  Вт/м·°С – древесный заполнитель при вертикальной ориентации [3]);

$\phi = 0,7$  – объемная концентрация заполнителя, определена в [3];

$K_1$  – поправочный коэффициент, позволяющий рассчитать теплопроводность системы с взаимопроникающими компонентами, к которым относится в частности цементный камень, в зависимости от отношения  $\lambda_2 / \lambda_1$  и объемной концентрации заполнителя  $\phi$  [1] ( $K_1 = 0,41$  – при горизонтальной ориентации древесного заполнителя,  $K_1 = 0,35$  – при вертикальной ориентации древесного заполнителя).

Подставив все значения в формулу 4.3, получим коэффициент теплопроводности для арболита с горизонтальной ориентацией заполнителя:

$$\lambda = 0,41 \cdot 0,87 \cdot \frac{2 \cdot 0,87 + 0,18 - 2 \cdot 0,7 \cdot (0,87 - 0,18)}{2 \cdot 0,87 + 0,18 + 0,7 \cdot (0,87 - 0,18)} = 0,14 \text{ Вт/м} \cdot \text{С}.$$

Для арболита с вертикальной ориентацией заполнителя:

$$\lambda = 0,35 \cdot 0,87 \cdot \frac{2 \cdot 0,87 + 0,09 - 2 \cdot 0,7 \cdot (0,87 - 0,09)}{2 \cdot 0,87 + 0,09 + 0,7 \cdot (0,87 - 0,09)} = 0,09 \text{ Вт/м} \cdot \text{С}.$$

Нормативное значение коэффициента теплопроводности для арболита с беспорядочной ориентацией заполнителя составляет 0,12 Вт/м·°С [3]. Следовательно, при вертикальной ориентации древесного заполнителя возможно добиться снижения коэффициента теплопроводности на 25%.

Результаты определения теплопроводности представлены в таблице 1. Схема прохождения теплового потока через образец представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. – Схема прохождения теплового потока при определении теплопроводности арболита, полученного по технологии колебательного уплотнения:  
а – горизонтальное расположение щепы; б – вертикальное расположение щепы

Таблица 1. – Результаты определения теплопроводности и прочности арболита, модифицированного добавками

№ состава	Способ уплотнения	Прочность арболита при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности арболита по экспериментальным данным, Вт/(м·°С)
1	Виброуплотнение	1,88	0,120
	Виброуплотнение с пригрузом	2,01	0,120
2	Виброуплотнение	1,89	0,120
	Виброуплотнение с пригрузом	2,00	0,120
	Колебательное уплотнение (вертикальное расположение щепы)	4,10	0,095

Из таблицы следует, что теплопроводность арболита с ориентировано уложенным заполнителем на 20,8 % меньше, чем при использовании виброуплотнения и виброуплотнения с пригрузом. Теоретическое обоснование приведено выше. Это также можно объяснить тем, что вектор теплового потока и градиент температуры в арболите с направленной укладкой заполнителя не совпадают, в отличие от традиционного арболита. Фотография арболитового блока в разрезе, изготовленного по технологии колебательного уплотнения представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. - Арболитовый блок в разрезе:  
а – разрез по направлению укладки щепы; б – поперечный разрез

Полученные результаты использованы для теплотехнического расчёта толщины стены, с нормативным коэффициентом теплопроводности материала ограждающей конструкции в условиях эксплуатации и с прогнозируемым коэффициентом теплопроводности [2]. Схема наружной ограждающей конструкции представлена на рисунке 3.

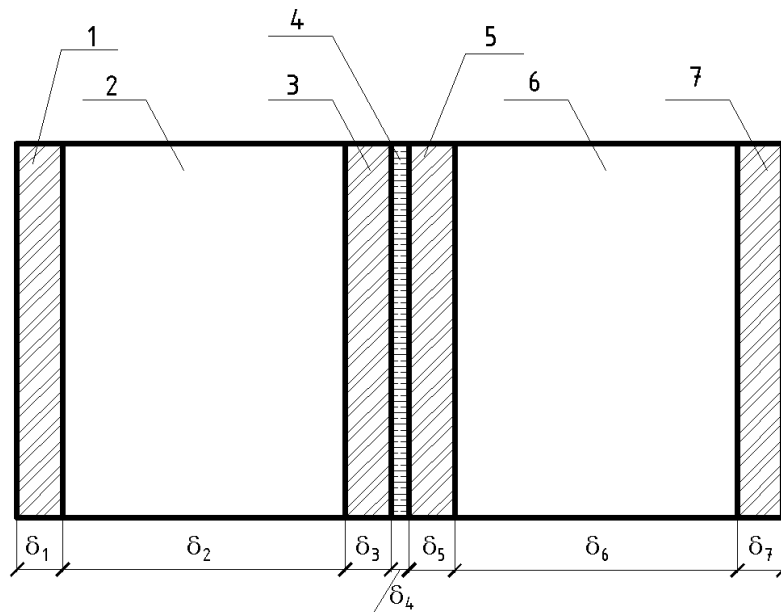


Рисунок 3. – Наружная ограждающая конструкция:  
1, 3, 5, 7 – отделочный слой; 2, 6 – арболит; 4 – кладочный раствор

Характеристики материалов ограждающей конструкции:

1, 3, 5, 7 – керамзитобетон на керамзитовом песке:  $\rho = 550 \text{ кг/м}^3$ ,  $\delta = 0,025 \text{ м}$ ,  $\lambda = 0,169 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ ; 4 – цементно-перлитовый раствор:  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ ,  $\delta = 0,010 \text{ м}$ ,  $\lambda = 0,260 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ ; 2, 6 – арболит:  $\rho = 550 \text{ кг/м}^3$ ,  $\delta = x \text{ м}$ ,  $\lambda = 0,230 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ .

Сопротивление теплопередаче  $R_T$ ,  $(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , ограждающей конструкции определяется по формуле

$$R_T = \frac{1}{\alpha_B} + R_K + \frac{1}{\alpha_H}, \quad (2)$$

где  $\alpha_B$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$  [3];

$R_K$  – термическое сопротивление ограждающей конструкции,  $(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})/\text{Вт}$ ;

$\alpha_H$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции для зимних условий,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$  [3].

Термическое сопротивление многослойной ограждающей конструкции с последовательно расположенными однородными слоями  $R_K$ ,  $(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})/\text{Вт}$  определяется по формуле

$$R_K = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (3)$$

где  $R_K$  – термическое сопротивление отдельных слоев конструкции,  $(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})/\text{Вт}$ .

Термическое сопротивление слоя многослойной конструкции  $R$ ,  $(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , определяется по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (4)$$

где  $\delta$  – толщина слоя, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала ограждающей конструкции в условиях эксплуатации, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Нормативное сопротивление теплопередаче наружных стен  $R_{\text{н,норм}} = 3,2$  (м<sup>2</sup>·°C)/Вт [3].

Определяем толщину стены из арболитовых блоков из формулы (2):

$$R_{\text{т}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{\delta_6}{\lambda_6} + \frac{\delta_7}{\lambda_7} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = R_{\text{т,норм}}, \quad (5)$$

Для нормативного коэффициента теплопроводности:

$$3,2 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{x}{0,230} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{0,010}{0,260} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{x}{0,230} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{1}{23},$$

откуда  $x = 0,28$  м.

Для прогнозируемого коэффициента теплопроводности ( $\lambda = 0,12$  Вт/(м·°C)):

$$3,2 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{x}{0,120} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{0,010}{0,260} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{x}{0,120} + \frac{0,025}{0,169} + \frac{1}{23},$$

откуда  $x = 0,14$  м.

Из представленных выше расчётов следует, что толщина стены в первом случае будет равна 0,69 м, во втором 0,39 м.

Таким образом, для обеспечения стеной из арболитовых блоков нормативного сопротивления теплопередаче  $R_{\text{т,норм}} = 3,2$  (м<sup>2</sup>·°C)/Вт достаточно толщины стены 690 мм из блоков, изготовленных по традиционной технологии уплотнения и 390 мм из блоков изготовленных по разработанной в данной работе технологии колебательного уплотнения.

Так как в блоках предусматривается отделочный слой, то необходимо проверить многослойную конструкцию на сопротивление паропрооницанию. Исходной предпосылкой будет то, что плоскость возможной конденсации будет располагаться на границе отделочного слоя и блока.

Сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации  $R_{\text{п}}$ , м<sup>2</sup>ч Па/кг, должно быть не менее требуемого сопротивления паропрооницанию  $R_{\text{п,тр}}$ , определяемого по формуле [3]:

$$R_{\text{п,тр}} = R_{\text{п,н}} \cdot \frac{e_{\text{в}} - e_{\text{к}}}{e_{\text{к}} - e_{\text{н,от}}} = 0,1092 \cdot \frac{1135,2 - 594,54}{594,54 - 423,94} = 0,346 \text{ м}^2\text{ч Па/кг}, \quad (6)$$

где  $R_{\text{п,н}}$  – сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции в пределах от плоскости возможной конденсации до наружной поверхности ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>ч Па/кг;

$e_{\text{в}}$  – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетных температуре и влажности воздуха, определяемое по формуле (7);

$e_{\text{к}}$  – максимальное парциальное давление водяного пара в плоскости возможной конденсации, Па при температуре в плоскости возможной конденсации  $t_{\text{к}}$ , °C, определяемой по формуле (8);

$e_{\text{н,от}}$  – парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па, при средней температуре наружного воздуха за отопительный период,  $t_{\text{н,от}}$ , определяемое по формуле (9).

$$e_{\text{в}} = 0,01 \cdot \varphi_{\text{в}} \cdot E_{\text{в}} = 0,01 \cdot 55 \cdot 2064 = 1135,2 \text{ Па}, \quad (7)$$

где  $\phi_B$  – расчетная относительная влажность внутреннего воздуха, %;  
 $E_B$  – максимальное парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па,  
при расчетной температуре воздуха.

$$t_K = t_B - \frac{t_B - t_{н.от}}{R_m} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_B} + \sum R_{Ti} \right) = 18 - \frac{18 - (-2)}{3,2} \cdot \left( \frac{1}{8,7} + 2,82 \right) = 3,33^\circ\text{C}, \quad (8)$$

где  $t_B$  – расчетная температура внутреннего воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_{н.от}$  – средняя температура наружного воздуха за отопительный период,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $R_{Ti}$  – термическое сопротивление слоев ограждающей конструкции от внутренней поверхности конструкции до плоскости возможной конденсации,  $\text{м}^2\text{C}/\text{Вт}$ .

$$e_{н.от} = 0,01 \cdot \phi_{н.от} \cdot E_{н.от} = 0,01 \cdot 82 \cdot 517 = 423,94 \text{ Па}, \quad (9)$$

где  $\phi_{н.от}$  – средняя относительная влажность наружного воздуха за отопительный период, %;  
 $E_{н.от}$  – максимальное парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па,  
при средней температуре за отопительный период  $t_{н.от}$ ,  $^\circ\text{C}$ .

Сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции  $R_{п}$ ,  $\text{м}^2\text{ч Па}/\text{кг}$ , следует определять по формуле:

$$R_{п} = \sum \frac{\delta}{\mu} = \frac{0,025}{0,2289} + \frac{0,14}{0,11} + \frac{0,025}{0,2289} + \frac{0,01}{0,53} + \frac{0,025}{0,2289} + \frac{0,14}{0,11} = 2,89 \text{ м}^2\text{ч Па}/\text{кг}, \quad (10)$$

где  $\mu$  – расчетный коэффициент паропрооницаемости материала слоя ограждающей конструкции,  $\text{мг}/(\text{мч Па})$ .

Условие  $R_{п} = 2,89 \text{ м}^2\text{ч Па}/\text{кг} \geq R_{п.тр} = 0,346 \text{ м}^2\text{ч Па}/\text{кг}$  выполняется, следовательно, на границе отделочного слоя и блока не будет происходить накопление влаги.

Кроме того, в работах [4, 5], приводятся данные об уникальных свойствах арболита, благодаря его высокой теплоемкости. Так например, для стены толщиной 40 см для нагрева до  $18^\circ\text{C}$  требуются следующие расходы энергии:

- бетон тяжелый с утеплителем – 10 000 кДж;
- камни керамические с утеплителем – 9000 кДж;
- ячеистый бетон – 4000 кДж;
- арболит – 9000 кДж.

При сопоставимых расходах на нагрев с тяжелым бетоном и керамическими камнями арболит при этом удерживает (аккумулирует) теплоту в течение 27 ч. В то время как остальные материалы при отрицательной наружной температуре остывают до  $0^\circ\text{C}$  через:

- бетон тяжелый с утеплителем – 6 ч;
- камни керамические с утеплителем – 9 ч;
- ячеистый бетон – 3 ч.

Таким образом, арболит является стеновым тепловым аккумулятором и требует значительно меньших энергетических затрат на создание и поддержание комфортных условий проживания. Т.е. остальные материалы при прочих равных условиях потребляют в течение суток больше энергии на:

- бетон тяжелый с утеплителем – 30 000 кДж;
- камни керамические с утеплителем – 15 000 кДж;
- ячеистый бетон – 25 000 кДж.

**Заключение.** Направленная укладка заполнителя в арболите позволяет получить уникальный по своим теплотехническим свойствам материал с низкой теплопроводностью и высокой теплоемкостью. Такой материал в стеновой конструкции является не только несущим элементом, но и тепловым аккумулятором.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Довжик, В.Г. Учет эксплуатационной влажности бетонов при расчете и нормировании их теплопроводности / В.Г. Довжик // Бетон и железобетон. – 2008. – № 3. – С. 6–10.
2. Ягубкин, А.Н. Инновационный конструкционно-теплоизоляционный арболит с заданными свойствами / А.Н. Ягубкин // Методология и принципы ценообразования в строительстве. Инновационные технологии в строительной отрасли и их внедрение BIM-технологии : материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 мая 2017 г / РУП «РНТЦ» ; редкол.: Л.Ф. Кручанова [и др]. – Минск, 2017. – С. 68–70.
3. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-2.04-43-2006. – Введ. 01.07.2007. – Минск : Минстройарх, 2007. – 35 с.
4. Наназашвили, И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции / И.Х. Наназашвили. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Стройиздат, 1990. – 415 с.
5. Бужевич, Г.А. Арболит / Г.А. Бужевич. – М. : Изд-во лит. по стр-ву, 1968. – 244 с.



**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОТОТИПИРОВАНИЕ КОНЦЕВЫХ ЗАЖИМОВ  
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ И ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ  
КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ**

*Д.Н. Шабанов, Е.А. Зябкин*

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: d.shabanov@psu.by, e.zyabkin@psu.by

*Представлена возможность применения методики моделирования и прототипирования для производства концевых зажимов. Данное изделие позволит получить характеристики напряженного и деформированного состояния композитной арматуры периодического профиля. На базе систем автоматизированного проектирования был смоделирован концевой зажим для испытания и получения предварительного напряжения композитной арматуры периодического профиля и создан прототип всей конструкции в целом.*

*Ключевые слова: испытание, напряжение, концевой зажим, моделирование, прототипирование.*

**MODELING AND PROTOTYPING OF THE END LIMPS  
FOR TESTING AND OBTAINING PRELIMINARY VOLTAGE  
OF THE COMPOSITE VALVE**

*D. Shabanov, E. Zyabkin*

Polotsk state University, Belarus

email: d.shabanov@psu.by, e.zyabkin@psu.by

*The article presents the possibility of using the modeling and prototyping techniques for the production of terminal clamps. This product will make it possible to obtain the characteristics of the stressed and strained state of the composite reinforcement of the periodic profile. On the basis of computer-aided design systems, an end clamp for testing and obtaining prestressing of a composite reinforcement of a periodic profile was modeled and a prototype of the entire structure as a whole was created.*

*Keywords: testing, tension, terminal clamp, modeling, prototyping.*

**Введение.** Современные взгляды на использование неметаллической арматуры получили большой резонанс, в сравнении с металлическим армированием. Однако физические и механические свойства композитной арматуры в отдельных параметрах превосходят металлическую. Для расширения применения сложного композитного армирования и детального изучения его совместной работы с бетоном целесообразно продолжить исследования и испытания различных конструкций, а также использование неметаллической арматуры в предварительно напряженных бетонных конструкциях.

Первое, и самое основное, быстрое изготовления прототипов необходимо чтобы посмотреть, как модель будет выглядеть в материале. Кроме того, на готовой модели можно проводить различные тесты еще до того, как будет готов окончательный вариант изделия.

Однако, прототипы – это еще не все. Следующая ступень – быстрое производство. Уже сейчас некоторые технологии позволяют изготавливать готовые предметы из различных материалов. Это идеальное решение для малосерийного производства, поскольку

стандартный техпроцесс дает возможность сделать что угодно за относительно небольшое время, но с высокими затратами на открытие производства.

Нередко требуется подтверждение работоспособности или проверка определенных эксплуатационных характеристик. В таких случаях наиболее простым способом проверки работоспособности и надежности является создание опытных образцов или макетов с последующим испытанием в условиях, приближенных к реальным. [1]

При помощи систем автоматизированного проектирования был смоделирован концевой зажим. Данный зажим используется в устройствах, где необходимо получить значительное усилие зажима или изменить его направление, что позволяет увеличивать и изменять направление передаваемой силы. Чтобы обеспечить сдерживающее усилие, поверхность клина внутри зажима должна создавать необходимое сопротивление на контактной поверхности, возникающее в результате пластической деформации композитной арматуры, когда она перемещается относительно клиньев, что дополняет силу трения.

**Исследовательская часть.** В ходе нашего исследования, мы использовали программный комплекс «ANSYS SpaceClaim» для создания модели концевой зажима. SpaceClaim позволяет не только эффективно подготавливать модели, созданные в сторонних CAD-пакетах, для численного моделирования или 3D-печати, но и создавать модели «с чистого листа». Для этого имеется весь необходимый функционал – модель может создаваться как с использованием твердотельных операций, так и по эскизам.

Разработанное устройство (рис. 1) для испытания композитной арматуры состоит из двух пластин (1), установленных по концам стеклопластиковой арматуры, внутри которых расположены клинья (2), обжимающие стеклопластиковую арматуру (3), исключая возможные возникновения концентраторов напряжений. Особенность конструктивного исполнения устройства состоит в разборности элементов конструкции, что обеспечивает многократность его использования. Задача состоит в снижении затрат на производство цементно-бетонных изделий, армированных композитной арматурой периодического профиля. Использование данного устройства позволяет повысить достоверность полученных результатов при испытании за счет отсутствия разрушения в местах зажима стержней. Кроме того, при помощи разработанного устройства возможно создание предварительного напряжения стеклопластиковой арматуры [2].

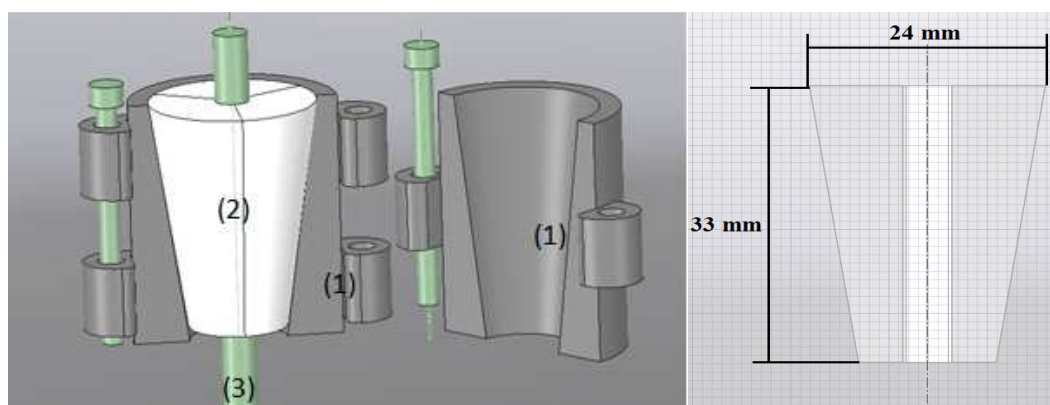


Рисунок 1. –Модель концевых зажимов созданная в программном комплексе ANSYS SpaceClaim

Упругие и пластические аналитические решения. На начальном этапе ( $h \rightarrow 0$ ) вдавливания клиновидного пуансона с плоским основанием можно использовать для решения линейной упругой задачи давления пуансона с прямоугольным основанием на полупространстве [4, 5]:

$$F = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \frac{\sqrt{wl}}{m} h, \quad (1)$$

где  $E = 210$  ГПа – модуль Юнга;  
 $\nu = 0,3$  – коэффициент Пуассона;  
 $w = 0,024$  м – ширина усеченного клина;  
 $l = 0,033$  м – длина усеченного клинового основания;  
 $m$  – параметр, определяемый как отношение сторон основания (если  $l / w = 1,375$ ,  $m = 0,95$  (рис. 2)).

Уравнение (1) было получено путем обобщения решения задачи Буссинеска на действие нормальной сосредоточенной силы на поверхности упругого полупространства. Следует отметить, что решение (1) получено на основе предположения о бесконечно малой механике, где малые деформации предполагаются и разность между фактическими и эталонными конфигурациями пренебрегают. В этом случае форма поверхности клина не имеет решающего значения, необходимы только размеры усеченных клиновых оснований. Решение справедливо только для очень слабых сил вдавливания и, следовательно, для неглубоких глубин проникновения ( $h \rightarrow 0$ ), когда пластичной зоной и контактом на лицевой стороне клина можно пренебречь. Когда получено решение (1), предполагается, что контактное давление равномерно распределено, не было трения, а  $h$  принималось за среднее значение смещения. Такие условия не имеют решающего значения, так как в отличие от решения для жесткого пуансона (постоянные смещения и переменные контактные давления) составляет около 8% [4].

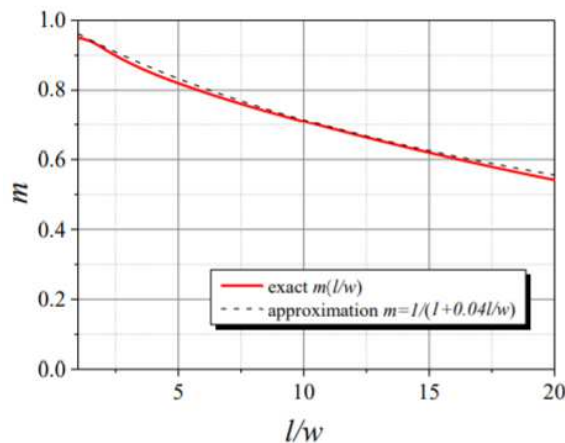


Рисунок 2 [3]. – Параметр  $m$  в уравнении (1) по отношению к базовой стороне  $l / w = 1,375$

$$F = \frac{210 \cdot 10^6}{1 - 0.3^2} \cdot \frac{\sqrt{24 \cdot 33}}{0.95} h = 6836 N.$$

Была предложена упрощенная аналитическая модель для определения силы вдавливания неидеального (усеченного) клинового пуансона с симметрично наклонными сторонами ( $20^\circ$ ).

Следующим этапом стало создание прототипа концевой зажима для испытания и получения предварительного напряженной композитной арматуры периодического профиля (рис. 3).



**Рисунок 3. – Прототип концевго зажима  
для испытания и получения предварительного напряженной композитной арматуры  
периодического профиля**

Технология компьютерного моделирования нашла свое применение для изготовления быстрых прототипов с целью визуализации концептуальных изделий. Физические характеристики изготавливаемых моделей-прототипов являются, пожалуй, основным критерием при выборе метода быстрого прототипирования: они определяют качество модели, а также возможность или невозможность использования прототипа для решения тех или иных задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kim, W. Metal flow in wedge indentation of V- and W-shaped tools / W. Kim, K. Kawai, H. Koyama // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – No. 1(189). – P. 392–400.
2. Шабанов, Д.Н. Метод моделирования и прототипирования как один из наиболее актуальных, объективных и надежных методов научных исследований / Д.Н. Шабанов, Е.А. Зябкин, Е.А. Трамбицкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 16. – С. 48–54.
3. Effects of blade tip geometry on cutting characteristics of lead alloy sheet subjected to wedge indentation / P. Mitsomwang [et al.] // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 719. – P. 137–141.
4. Modeling of indentation and slip of wedge punch / A.S. Semenov [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – No. 6. – P. 78–101.
5. Timoshenko, S.P. Theory of Elasticity / S.P. Timoshenko, J.N. Goodier. – 3 Ed. – McGraw-Hill, New York, 1970. – 519 p.
6. Куликовский, Д.П. BIM-технологии. Опыт внедрения / Д.П. Куликовский // Технологии интеллектуального строительства. – 2015. – № 3.
7. Волкинд, Д. Прямой и обратный инжиниринг с ANSYS SpaceClaim: применение для САМ, САЕ и 3D-сканирования / Д. Волкинд, К. Кравченко, М. Булатов.
8. Куликовский, Д. Повышение рентабельности проектно-строительного производства в условиях применения технологии информационного моделирования (BIM). Новая роль архитектора/проектировщика / Д. Куликовский, А. Паршин // Архитектура и строительство. – 2015. – № 2.
9. Бабичев, С.В. Инженерный анализ средствами T-FLEX / С.В. Бабичев // САПР и графика. – 2016. – декабрь.

**БЕТОН НА КУБОВИДНОМ ЩЕБНЕ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ  
В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО И ВНЕЦЕНТРЕННОГО СЖАТИЯ**

Н.Л. Полейко, С.Н. Леонович, А.И. Пелюшкевич

Белорусский национальный технический университет, Минск

email: pdn13@land.ru, snleonovich@yandex.ru, andrei.pelsh@mail.ru

*Требования к бетонам по их эксплуатационным качествам, области применения, физико-техническим свойствам, условиям долговечности расширяют область экономического использования различных видов заполнителей. Если учесть, что заполнители занимают в бетоне до 80% объема, а стоимость их достигает 50% стоимости бетонных и железобетонных конструкций, то становится понятным, что правильный выбор заполнителей, наиболее рациональное их применение имеют большое влияние на свойства бетонной смеси, бетонных и железобетонных конструкций, технико-экономическую эффективность производства строительных изделий из сборного, монолитного бетона и железобетона в целом. Приводятся сравнительные результаты испытаний обычного и кубовидного щебня, исследования основных физико-технических свойств бетона на кубовидном щебне из гранита (прочность при сжатии, растяжение при раскалывании, морозостойкость, водонепроницаемость, водопоглощение и коэффициент сопротивления воздухопроницаемости). В результате проведенных сравнительных исследований установлено, что применение кубовидного щебня в качестве крупного заполнителя целесообразно в бетонах конструкций, работающих в условиях центрального и внецентренного сжатия.*

*Ключевые слова: бетон, щебень кубовидный, бетонные конструкции, сборный железобетон.*

**CONCRETE ON CUBIC LUMBER FOR STRUCTURES  
UNDER CONDITIONS OF CENTRAL AND VNCENTRIC COMPRESSION**

N. Poleyko, S. Leonovich, A. Pelyushkevich

Belarussian National Technical University, Minsk

email: pdn13@land.ru, snleonovich@yandex.ru, andrei.pelsh@mail.ru

*Requirements for concretes regarding their operational qualities, areas of application, physical-technical properties, and terms of durability expand the area of economic application of fillers of various types. Considering that fillers occupy up to 80% of the concrete volume and their cost reaches 50% of the cost of concrete and reinforced concrete products, it becomes clear that correct selection of fillers and the most rational application of them have a great on properties of the concrete mix of concrete and reinforced concrete structures, technical-economic efficiency of producing building products made of precast, monolithic concrete and reinforced concrete in whole. The article presents comparative results of tests of ordinary and cubiform crushed stones, studies of basic physical-technical properties of concrete with cubiform granite crushed stone (compression strength, split-tensile strength, frost-resistance, waterproofness, water adsorption, and coefficient of resistance to air permeability). As a result of comparative studies conducted, it*

*is established that the use of cubiform crushed stone as a large-size filler is reasonable for concretes of structures operating under conditions of central and eccentric compression.*

*Keywords: concrete, cubiform crushed stone, concrete structures, precast reinforced concrete.*

Основным материалом для возведения разнообразных строительных конструкций, в том числе и сборных, является бетон. Название бетона зачастую связывают с видом используемых заполнителей, которые занимают в бетоне до 80 % объема, а их стоимость достигает 30...50 % стоимости бетонных и железобетонных конструкций. Поэтому изучение и правильный выбор заполнителя имеет важное значение для получения бетона с требуемыми физико-механическими показателями.

Одна из характеристик заполнителей – форма их зерен. В нормативных документах ее принято характеризовать определенными терминами.

Щебень узких фракций – дробленый каменный материал с размером зерен, соответствующим стандартным ситам с круглыми отверстиями диаметром от 2,5 до 20 мм, разделенный на фракции диапазоном 2,5 или 5 мм.

Щебень кубовидный – щебень узких фракций с содержанием зерен кубовидной формы не менее 50 % по массе и содержанием зерен пластинчатой и игловатой форм не более 15 % по массе.

Щебень кубовидный мелкий – щебень кубовидный с размером зерен от 2,5 до 5 мм.

Зерна кубовидной формы – зерна щебня с околотой поверхностью в форме призмы или многогранника, толщина и ширина которых меньше длины не более чем в 2 раза.

Щебень из плотных горных пород – минеральный зернистый сыпучий материал, получаемый дроблением массивных изверженных (магматических) интрузивных горных пород (гранит, диорит, габбро и др.) со средней плотностью от 2,5 до 3,0 г/см<sup>3</sup>.

Щебень кубовидный выпускают в виде следующих основных фракций, мм (по ситам с круглыми отверстиями): от 2,5 до 5; св. 5 до 7,5; св. 5 до 10; св. 7,5 до 12,5; св. 10 до 15; св. 12,5 до 17,5; св. 15 до 20.

Соответствие размеров фракции щебня по ситам с круглыми отверстиями и зерен щебня по ситам с квадратными отверстиями приведено в таблице 1.

Таблица 1. – Соответствие размеров фракции щебня по ситам с круглыми отверстиями и зерен щебня по ситам с квадратными отверстиями

Диаметр отверстия контрольного сита с круглыми ячейками из стандартного набора сит для щебня, мм	Соответствующий размер зерен щебня по ситам с квадратными ячейками, мм
2,5	2
5	4
7,5	6,3
10	8
12,5	10
15	12
17,5	14
20	16

Щебень кубовидный, в зависимости от содержания зерен кубовидной, пластинчатой и игловатой формы, а также от содержания пылевидных и глинистых частиц классифицируют по сортам в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2. – Классификация щебня в зависимости от содержания зерен

Сорт кубовидного щебня	Содержание зерен кубовидной формы, масс. %, не менее	Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, масс. %, не более	Содержание пылевидных и глинистых частиц, мас. %, не более
I	Свыше 65 до 100 вкл.	До 8 вкл.	До 0,5 вкл.
II	Свыше 50 до 100 вкл.	До 15 вкл.	До 10 вкл.

Зерна кубовидного щебня влияют на плотность упаковки заполнителя в объеме. Многочисленными экспериментальными данными доказано, что наиболее плотная укладка достигается в заполнителе, содержащем зерна в виде различных правильных многогранников [1–4].

Кубовидный щебень по форме зерен позволяет получать большую плотность упаковки по сравнению с обычным щебнем, так как, во-первых, содержит малое количество зерен пластинчатой и игловатой формы и, во-вторых, характеризуется содержанием зерен кубовидной формы (соотношение толщины (ширины) к длине 1:2 и менее). В зависимости от качества кубовидного щебня содержание таких зерен в нем колеблется от 50 до 65 % по массе, согласно СТБ 1311-2002 «Щебень кубовидный из плотных горных пород. Технические условия».

Представляет интерес исследование основных физико-механических характеристик бетона на кубовидном щебне, поскольку в настоящее время данный вид заполнителя используется в основном в дорожном строительстве для устройства оснований под автомобильные дороги.

Предварительно в лабораторных условиях были проведены испытания по определению физико-механических свойств двух фракций кубовидного щебня. Результаты испытаний по определению зернового состава приведены в таблице 3.

Марку по дробимости крупного заполнителя определяли по степени разрушения пробы материала при сжатии в цилиндре при нормируемой нагрузке. Результаты испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 3. – Результаты испытаний по определению физико-механических свойств

Наименование щебня (НД)	Частные остатки на ситах, %	Полные остатки, %	Требования НД
Кубовидный фр. 2–4 мм	1,25–5,4	98,9	98–100
	2,5–86	93,5	95–100
	5–7,5	7,5	до 10
	7,5–0	0	Не допускается
Кубовидный фр. 6,3–10	5–8,5	99,2	95–100
	7,5–24,6	90,7	90–100
	10–64,3	66,1	30–80
	12,5–1,8	1,8	до 10
	15–0	0	Не допускается

Таблица 4. – Результаты испытаний по дробимости крупного заполнителя

Наименование щебня	Потеря массы при испытаниях на дробимость, %	Марка щебня по дробимости
Кубовидный фр. 2–4	9,2	1400
Кубовидный фр. 6,3–10	11,5	1400

Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы определяли по ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний», а содержание зерен кубовидной формы определяли по СТБ 1311-2002 «Щебень кубовидный из плотных горных пород. Технические условия». Результаты испытаний представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Результаты испытаний по содержанию зерен

Наименование щебня (НД)	Содержание зерен пластинчатой и игловатой фор- мы, %	Содержание зерен кубовидной формы, %
Кубовидный фр. 2–4	2,1	86,2
Кубовидный фр. 6,3–10	5,0	80,7

Насыпную плотность, среднюю плотность зерен крупного заполнителя и содержание зерен слабых пород определяли по ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний». Результаты испытаний представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Определение насыпной плотности, средней плотности зерен крупного заполнителя и содержания зерен слабых пород

Наименование щебня (НД)	Насыпная плот- ность, кг/м <sup>3</sup>	Средняя плотность зе- рен, кг/м <sup>3</sup>	Содержание зерен слабых пород, %
Кубовидный фр. 2–4	1320	2580	2,2
Кубовидный фр. 6,3–10	1390	2580	1,6

Целью экспериментальных исследований являлось получение сравнительных показателей основных физико-механических характеристик бетона, изготовленного с использованием обычного и кубовидного щебня. Исследования проводились на восьми составах бетонной смеси. Использовались следующие фракции заполнителей: 5–10; 10–15; 15–20 мм и смеси фракций в соотношении 40 % фракции 5–10 мм и 60 % фракции 15–20 мм. Образцы для проведения испытаний готовились в лабораторных условиях; перед испытанием хранились в нормально-влажностной среде; подвергались испытаниям в возрасте 28 сут. Определяли следующие показатели: прочность при сжатии, прочность при растяжении при раскалывании, водопоглощение, водонепроницаемость и морозостойкость (по коэффициенту воздухопроницаемости). Перед формованием образцов для проверки правильности подобранных составов бетонных смесей определяли среднюю плотность бетонной смеси. Результаты испытаний представлены в таблице 7.



Таблица 7. – Определение средней плотности бетонной смеси

№ состава	Наименование и фракционный состав заполнителя	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>
1	Обычный фр. 5–10 мм	2410
2	Кубовидный фр. 5–10 мм	2430
3	Обычный фр. 10–15 мм	2380
4	Кубовидный фр. 10–15 мм	2390
5	Обычный фр. 15–20 мм	2405
6	Кубовидный фр. 15–20 мм	2420
7	Обычный фр. 5–20 мм	2400
8	Кубовидный фр. 5–20 мм	2430

Данные таблицы 7 показывают, что кубовидный щебень в бетонной смеси укладывается более плотно, чем обычный щебень, что отражается на изменении средней плотности бетонной смеси и, как следствие, на уменьшении выхода бетона в плотном теле. Различие в изменении средней плотности бетонной смеси зависит, во-первых, от фракционного состава заполнителя, а также от характеристик состава (соотношение растворной составляющей и крупного заполнителя, водоцементное отношение, удобоукладываемость и т.д.).

Наряду с такими характеристиками крупного заполнителя, как прочность, величина сцепления цементного камня с поверхностью зерен и т.д., на изменение прочностных показателей бетона оказывает влияние пустотность заполнителя в уплотненном состоянии. С одной стороны, чем она меньше, тем меньше требуется цементного теста для заполнения пустот и тем выше при равных расходах цемента должна быть прочность. С другой стороны, чем меньше пустотность заполнителя, тем выше средняя плотность затвердевшего бетона, а поскольку существует связь между плотностью и прочностью материала, следовательно, выше будет и прочность самого бетона. Результаты испытаний по определению прочности на сжатие и растяжение при раскалывании приведены на рисунке 1.

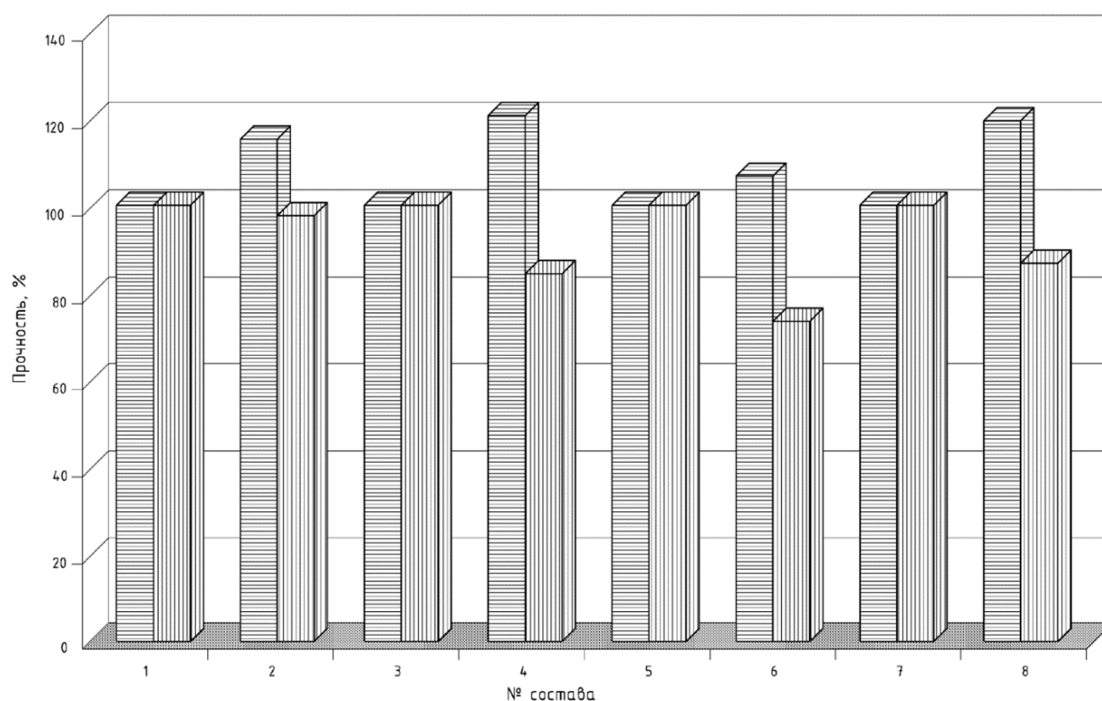


Рисунок 1. – Прочность при сжатии и на растяжение при раскалывании образцов на обычном и кубовидном щебне: ≡ – при сжатии; ||| – при растяжении

Данные, приведенные на рисунке, свидетельствуют о том, что кубовидный щебень наряду с повышением прочности при сжатии уменьшает сопротивление бетона разрушению при раскалывании. Исследования по определению влияния зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы на прочность бетона при растяжении показали, что при увеличении содержания данных зерен сопротивление бетона растяжению возрастает. Можно предположить, что снижение прочности на растяжение при раскалывании вызвано формой зерен кубовидного щебня (низкое содержание зерен пластинчатой и игловатой формы). Прочность при сжатии бетонных образцов на кубовидном щебне возрастает в среднем примерно на 25–30 %, а прочность при растяжении при раскалывании уменьшается на 5–12 %.

Увеличение прочности при сжатии также определяется гранулометрическим составом крупного заполнителя и характеристиками состава бетонной смеси. Не вполне ясной является зависимость сопротивления бетона растяжению при раскалывании от гранулометрического состава крупного заполнителя.

К весьма важным характеристикам качества бетонов относятся эксплуатационные показатели, такие как водонепроницаемость и морозостойкость, которые определяли согласно ГОСТ 12730.5–84 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» и ГОСТ 10060.2–95 «Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании». Для первоначальной оценки эксплуатационных показателей определяли водопоглощение образцов, поскольку оно является косвенной характеристикой водонепроницаемости и морозостойкости бетона. Показатели оценивали по ГОСТ 12730.3–78 «Метод определения водопоглощения» на приборе типа «АГАМА-2р». Результаты по определению водопоглощения, коэффициента сопротивления воздухопроницаемости и ожидаемая морозостойкость и водонепроницаемость образцов восьми составов приведены в таблице 8.

Таблица 8. – Результаты по определению водопоглощения, коэффициента сопротивления воздухопроницаемости и ожидаемой морозостойкости и водонепроницаемости образцов

№ состава	Водопоглощение, масс. %	Коэффициент сопротивления воздухопроницаемости, с/см <sup>3</sup>	Морозостойкость, цикл	Водонепроницаемость, МПа
1	5,3	7,3	150	0,6
2	4,7	8,8	150	0,6
3	4,4	10,2	200	0,8
4	4,4	10,5	200	0,8
5	4,8	9,8	200	0,8
6	4,1	12,6	200	0,8
7	6,2	6,2	100	0,4
8	4,9	9,3	150	0,6

Данные таблице 8 позволяют сделать вывод, что использование кубовидного щебня не влияет на морозостойкость и водонепроницаемость бетона. Незначительное различие в показателях водопоглощения и коэффициента сопротивления воздухопроницаемости вызвано нормальной погрешностью при определении контролируемых показателей.

**Выводы.** На основании результатов экспериментальных исследований рациональной областью применения кубовидного щебня можно считать его использование для изделий и конструкций, работающих в условиях центрального и внецентренного сжатия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Старчуков, Д.С. Бетоны ускоренного твердения с добавками твердых веществ неорганической природы / Д.С. Старчуков // Бетон и железобетон. – 2011. – 14. – С. 22–24.
2. Загер, И.Ю. Сравнительная оценка продуктов дробления горных пород месторождений нерудных строительных материалов Ямало-Ненецкого автономного округа / И.Ю. Загер, А.А. Яшинькина, Л.Н. Андропова // Строительные материалы. – 2011. – № 5. – С. 84–86.
3. Добшиц, Л.М. Определение морозостойкости крупного заполнителя для тяжелых бетонов / Л.М. Добшиц, И.И. Магомедэминов // Бетон и железобетон. – 2012. – № 4. – С. 16–19.
4. Петров, В.П. Пористые заполнители из отходов промышленности / В.П. Петров, С.А. Токарева // Строительные материалы. – 2011. – № 12. – С. 46–50.

## ДИСПЕРСНОЕ АРМИРОВАНИЕ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ ОТХОДАМИ ЩЕЛОЧЕСТОЙКОЙ СТЕКЛОСЕТКИ

Л.М. Парфёнова, В.А. Хватынец

Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

email: l.parfenova@psu.by, 12pgs1.khvatynets.v@pdu.by

*Рассматривается эффективность использования отходов щелочестойкой стеклотсетки при дисперсном армировании цементных систем на примере пенобетонов, плотностью 300-400 кг/м<sup>3</sup> и цементных плит, используемых в дорожном строительстве.*

*Ключевые слова: отходы щелочестойкой стеклотсетки, дисперсное армирование, фибра, пенобетон, цементные плиты, плотность, прочность на сжатие, нагрузка, перемещение.*

## DISPERSE REINFORCEMENT OF CEMENT SYSTEMS WITH WASTE OF ALKALINE-RESISTANT GLASS LINES

L. Parfenova, V. Khvatynets

Polotsk State University, Belarus

email: l.parfenova@psu.by, 12pgs1.khvatynets.v@pdu.by

*In the article, the effectiveness of using alkaline-wool glass waste with the disperse reinforcement of cement systems, in particular foam concrete and cement slabs used in road construction, is considered.*

*Keywords: waste alkali-resistant glass line, disperse reinforcement, fiber, percentage, foam concrete, cement slabs, density, compressive strength, load, displacement.*

Пенобетон является эффективным строительным материалом, имеющим ряд преимуществ: низкий коэффициент теплопроводности, повышенная огнестойкость, долговечность и т.д. Из пенобетона изготавливают бетонные блоки и панели для наружных стен и перегородок, бетонные плиты для покрытий крыш и перекрытий этажей и т.д. [1, 2]. Среди недостатков пенобетона следует отметить усадку, низкие значения прочностей при малых значениях плотности, низкую трещиностойкость [3]. Значительно улучшить физико-механические характеристики пенобетонов позволяет дисперсное армирование. Дисперсное армирование базальтовыми, полипропиленовыми, стеклянными волокнами используется для повышения прочности на растяжение при изгибе, прочности на сжатие, ударной вязкости, стойкости к трещинообразованию [4-6].

Перспективным материалом для дисперсного армирования пенобетона являются отходы производства щелочестойкой стеклотсетки ССШ-160(100)-1800/1800 ОАО «Полоцк-стекловолокно». Отходы представляют собой обрезки щелочестойкой стеклотсетки в виде полос, которые для проведения эксперимента нарезались на «мини» сетки (рис. 1). Характеристики щелочестойкой стеклотсетки приведены в таблице 1.



Рисунок 1. – Внешний вид отходов щелочестойкой стеклосетки

Таблица 1. – Характеристики щелочестойкой стеклосетки

Свойства волокна	Значение
Длина волокна, мм	20–25
Номинальная масса, г/м <sup>2</sup>	160
Разрывная нагрузка, Н	1800
Химическая устойчивость	Очень высокая
Электрическая проводимость	Очень низкая

Для оценки эффективности дисперсного армирования пенобетонов отходами щелочестойкой стеклосетки изготавливались образцы в форму куба с ребром 70 мм, с разным процентным содержанием отходов стеклосетки, которые после 28 суток нормально-влажностного твердения испытывались на сжатие в соответствии с ГОСТ 10180-2012 [7]. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

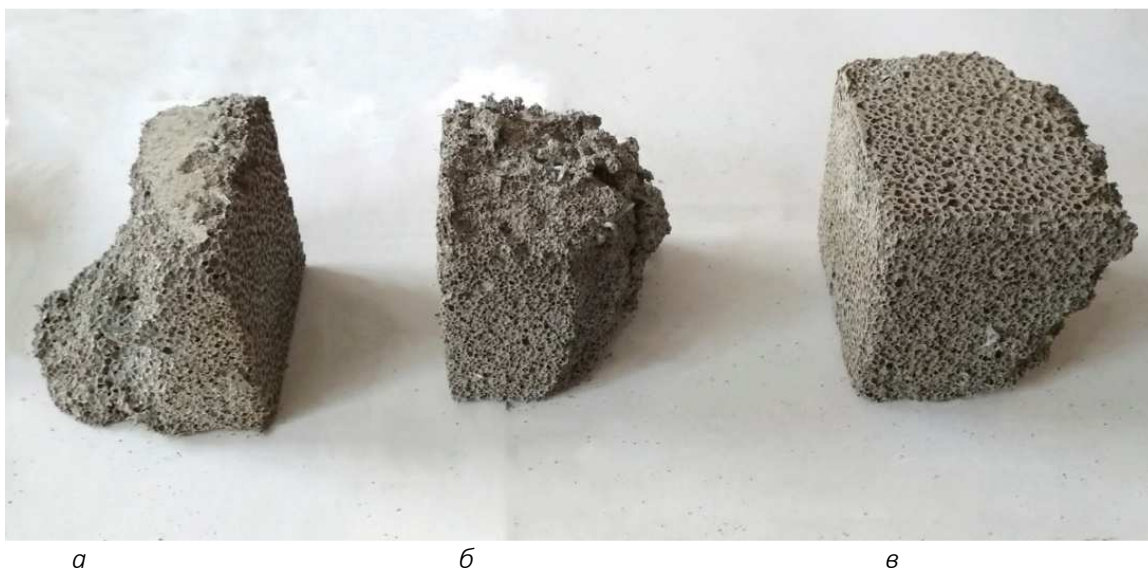
Таблица 2. – Влияние процентного содержания отходов стеклосетки на прочность и плотность пенобетона

Номер образца	В/Ц	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Вода, кг/м <sup>3</sup>	Пенообразователь, кг/м <sup>3</sup>	Процентное содержание фибры, % от массы цемента	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа
1	0,4	300	120	3,3	-	307,6	0,566
2	0,4	300	120	3,3	1	386,3	0,809
3	0,4	300	120	3,3	1,5	444,6	0,732
4	0,4	300	120	3,3	2	386,5	0,625

Результаты эксперимента показали, что при увеличении процентного содержания отходов стеклосетки увеличивается плотность образцов пенобетона. Данный эффект может

являться следствием разрушения волокнами стеклосетки пены (рис. 2). Установлено, что при количестве отходов стеклосетки в количестве 1 % от массы цемента прочность пенобетона увеличивается на 42,9 %, при этом увеличение количества стеклосетки до 2 % от массы цемента приводит к снижению прочности пенобетона, но не ниже прочности контрольного не армированного образца. Таким образом, при плотности пенобетона 300–400 кг/м<sup>3</sup> содержание отходов стеклосетки не должно превышать 1–1,5 % от массы цемента.

Характер разрушения дисперсно армированных образцов пенобетона становится менее хрупким. При увеличении количества отходов стеклосетки образцы после приложения нагрузки менее подвержены потере первоначальной формы в виде куба (рис 2, в).



**Рисунок 2. – Образцы пенобетона, армированные отходами стеклосетки после испытаний прочности на сжатие:**

**а – армирование в количестве 1%; б – армирование в количестве 1,5%;  
в – армирование в количестве 2%**

Эффективной областью применения отходов щелочестойкой стеклосетки может быть дисперсное армирование цементобетонных покрытий. При устройстве цементобетонных покрытий конструкция жестких дорожных одежд включает промежуточный слой из тяжелого бетона, который лежит на песчаном основании [8, 9]. При таком варианте устройства покрытия средний бетонный слой воспринимает большую часть нагрузок.

Дисперсное армирование бетонного основания позволяет перераспределять возникающие от действия транспортной нагрузки напряжения на большую площадь, и тем самым, способствовать стабильной работе дорожной одежды даже в неблагоприятных природно-климатических условиях[10].

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы плит, толщиной 30 мм, размером в плане 140 x 120 мм, с различным процентом фибрового армирования: без фибры, 10%, 20% и 30% от массы цемента. Для изготовления образцов использовался портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» СЕМІ 42,5Н; водоцементное отношение принято В/Ц=0,4. После формования образцы подвергались тепловлажностной обработке. Образцы испытывались на продавливание на гидравлическом прессе ПГМ-1000МГ4. Плиты укладывались на жесткое основание (плиту пресса), нагрузка передавалась через металлический круглый штамп диаметром 60 мм в геометрическом цен-

тре плит. Разрушение опытных образцов плит производилось ступенями до разрушения. Полученные, в ходе испытания, данные представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Влияние процентного содержания отходов стеклосетки на прочность и перемещение при продавливании цементных плит

Номер образца	Содержание отходов стеклосетки, %	Нагрузка, кН	Перемещение, мм
1	0	1,01	2,764
2	10	0,11	0,012
2	10	0,21	0,164
2	10	0,33	0,302
2	10	0,44	0,395
2	10	0,54	0,469
2	10	0,95	0,748
2	10	1,22	0,829
2	10	1,45	0,973
2	10	1,74	1,117
3	20	0,1	0,014
3	20	1,06	2,007
4	30	0,56	0,499
4	30	1,27	1,207

По полученным данным построен график, который отражает зависимость нагрузки и перемещений в зоне пластических деформаций исследуемых образцов плит (рис. 3).

Разрушение образцов без стеклосетки имеет хрупкий характер. Добавление отходов стеклосетки меняет характер разрушения, образцы с армированием сохраняли свою форму. Было очевидно, что отходы стеклосетки активно включались в работу и не давали образцу расколоться на части. Максимальную нагрузку без образования трещин выдержал образец с армированием в количестве 10% от массы цемента. При наибольшем усилии 1,74 кН зафиксировано наименьшая величина перемещения, которая составила 1,117 мм. Дальнейшее увеличение количества отходов стеклосетки до 20% и 30% от массы цемента не приводило к увеличению прочности образцов.

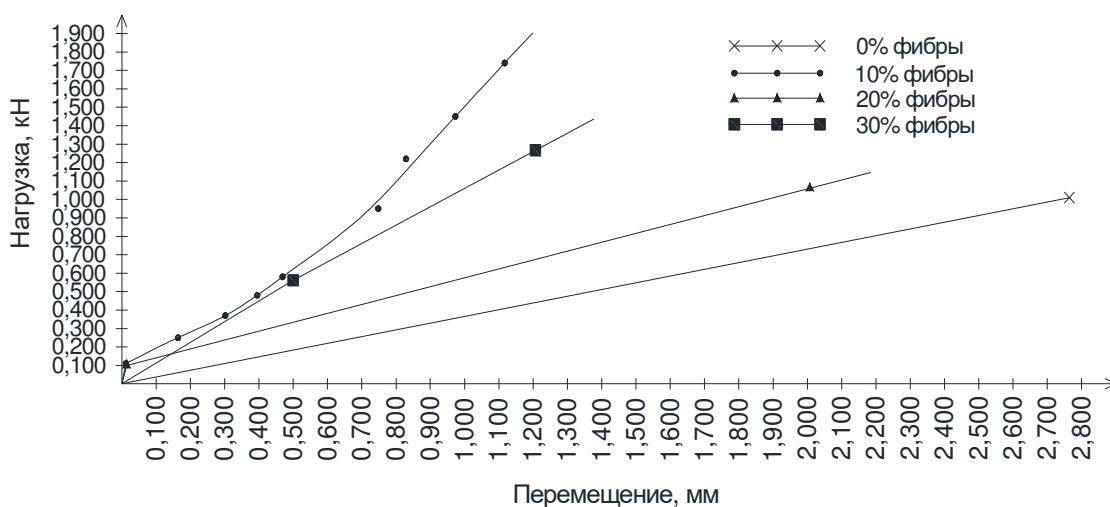


Рисунок 3. – Зависимость перемещений от нагрузки на штамп в центре плит

Таким образом, экспериментально установлено:

1. Прочность пенобетонов на сжатие увеличивается на 42,9% при армировании отходами стеклосетки в количестве 1% от массы цемента. Дисперсное армирование пенобетонов отходами щелочестойкой стеклосетки изменяет характер разрушения образцов, делая его менее хрупким.

2. Дисперсное армирование цементных плит отходами стеклосетки увеличивает прочность на продавливание на жестком основании. Оптимальное содержание отходов стеклосетки составляет 10% от массы цемента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Румянцев, Б.М. Технология и оборудование для производства пенобетонов методом сухой минерализации пены / Б.М. Румянцев, Е.А. Зудяев, Д.С. Критарасов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 1999. – № 3-4.

2. Чистов, Ю.Д. К вопросу о некоторых ключевых проблемах неавтоклавных ячеистых бетонов / Ю.Д. Чистов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2003. – № 8. – С. 24–25.

3. Парфёнова, Л.М. Физико-механические свойства бетонов с полиакрилонитрильными волокнами / Л.М. Парфёнова, М.С. Качан // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2011. – С. 30–34

4. Макаричев, В.В. О ячеистом бетоне, армированном волокнами / В.В. Макаричев // Фибробетон и его применение в строительстве. – 1979. – С. 28–33.

5. Волков, И. В. Фибровая арматура для бетонов / И.В. Волков, Э. М. Газин // Труды 1-й Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона. – 2001. – С. 1171–1179.

6. Калугин, И.Г. Пенобетоны дисперсно-армированные базальтовым волокном : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И.Г. Калугин ; Красноярск, 2011. – 22 с.

7. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам : ГОСТ 10180-2012. – Введ. 07.01.13. – М. : Стандартиформ, 2013. – 36 с.

8. Карпов, Б.Н. Сборные многокомпонентные дорожные покрытия / Б.Н. Карпов. – Режим доступа: <http://tekhnosfera.com/sbornye-mnogokomponentnye-dorozhnye-pokrytiya>. – Дата доступа: 20.11.2017.

9. Хватынец, В.А. Техногенные отходы литейного производства – эффективное сырье для приготовления смесей, используемых в укрепленных основаниях автомобильных дорог / В.А. Хватынец, Н.А.Аверченко, Д.Н. Шабанов // Автомобильные дороги и мосты. – 2015. – № 2. – С. 47–51.

10. Высоцкий, Ю.Д. Опыт эксплуатации сборных силикатобетонных дорожных покрытий / Ю.Д. Высоцкий // Автомобильные дороги. – 1972. – № 12. – С. 20–21.



Секция IV  
ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И УПРАВЛЕНИЕ НЕДВИЖИМОСТЬЮ

УДК 69.05

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
С ПОМОЩЬЮ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

О.В. Голушкова, А.Д. Гавриленко  
Белорусско-Российский университет, Могилев  
email: f\_st@bru.by

*Рассматривается возможность повышения уровня качества при производстве сборных железобетонных панелей перекрытия и покрытия для крупнопанельного домостроения с помощью статистических методов управления процессом изготовления этих изделий. В результате анализа производственной деятельности Могилевского домостроительного комбината был установлен параметр, который наиболее часто выходит за пределы допусков на этих изделиях. Для приведения панелей к требуемому качеству по данному параметру использованы контрольные карты Шухарта и причинно-следственная диаграмма Исикавы.*

*Ключевые слова: формирование качества, производство панелей перекрытия, статистические методы управления качеством, толщина панелей перекрытия.*

PROVISION OF QUALITATIVE INDICATORS  
OF PRODUCTION OF CONSTRUCTION CONSTRUCTIONS  
BY STATISTICAL METHODS

O. Golushkova, A. Gavrilenko  
Belarussian-Russian university, Mogilev  
email: f\_st@bru.by

*The possibility of improving the quality level in the production of prefabricated reinforced concrete overhead panels and coatings for large-panel housing construction using statistical methods for controlling the manufacturing process of these products is considered. As a result of the analysis of the production activities of the Mogilev House-Building Plant, a parameter was set which most often goes beyond the tolerances on these products. To bring the panels to the required quality in this parameter, the Shewhart control charts and the Ishikawa cause-and-effect diagram are used.*

*Keywords: quality formation, production of overlapping panels, statistical methods of quality management, thickness of overlapping panels.*

За последние 10–15 лет технологии изготовления железобетонных изделий сделали заметный шаг вперед, их качество и дизайн заметно улучшились. Это произошло благодаря внедрению, а затем и очень широкому распространению стендового формования безопасным (экструзионным) методом пустотных настилов, когда одна формовочная линия может обеспечить производство широкого диапазона изделий: перекрытий, покрытий, стеновых панелей.

Формирование качества возводимых зданий происходит на всем пути создания строительной продукции. Первым этапом создания строительной продукции является процесс проектирования объекта, потом процесс изготовления строительных изделий, конструкций и материалов из которых будет возводиться здание, затем непосредственно процесс выполнения строительно-монтажных работ на строительной площадке из конструкций по утвержденным проектам [1]. Проблема повышения уровня качества в строительстве является острой в условиях дефицита инвестиций, жесткой конкуренции и сокращения объемов строительно-монтажных работ.

Качество продукции – это совокупность свойств продукции, которые обуславливают ее возможность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Рассматривая выше изложенное, можно отметить при повышении качества выпускаемых конструкций и изделий увеличивается благосостояние предприятия и возрастают материальные возможности для дальнейшего развития и прогресса [2].

Качество строительных конструкций и изделий можно гарантировать при условии четкого соблюдения технологического процесса их изготовления. В связи с этим, возникает необходимость управления качеством процессов при производстве сборных железобетонных конструкций. Обеспечивать и поддерживать процессы изготовления конструкций на приемлемом и стабильном уровне, гарантируя при этом соответствие продукции установленным требованиям, можно с помощью статистического управления процессами изготовления.

Анализируя работу цехов Могилевского домостроительного комбината выпускающих железобетонные изделия, было выявлено изделие, а также параметр, который наиболее часто выходит за пределы допусков, определенных нормативными документами. Было определено, что таким изделием является панель перекрытия. Дефекты в данном изделии встречались довольно часто. В последствие они устранялись, что приводило к дополнительным затратам.

При производстве панелей перекрытия операционному контролю подвергаются:

- кассеты, проверяется степень очистки, смазка, геометрические параметры собранных форм (рулеткой, правилом);
- точность установки арматурного блока с фиксаторами (для обеспечения необходимой величины защитного слоя бетона);
- геометрические параметры верхней части кассет после их зажима (обмерные работы);
- процесс укладки бетонной смеси (должна вестись послойно и равномерно по длине изделия, а также по всей площади кассеты, для недопущения «распирания» стенок кассеты);
- степень заглаживания верхней поверхности и очистки оснастки от остатков бетона.

При приемочном контроле плит перекрытия на посту доводки проводятся приемосдаточные испытания:

- контроль геометрических параметров и прямолинейности изделия;
- проверяется качество очистки поверхности форм от бетона;
- контролируется качество антикоррозионной обработки закладных деталей;
- проверяется диаметр монтажных петель;
- осуществляется контроль категории лицевой поверхности стен;
- проверяется маркировка изделия.

Мы решили применить статистические методы управления качеством к процессу производства данного изделия: выявить существующие недостатки процессов изготовле-

ния панелей перекрытия, определить методы их устранения, что, несомненно, должно привести к улучшению качества исследуемых процессов.

Нами использовались следующие методы статистического анализа: вычисление и построение контрольной карты Шухарта и построение причинно-следственной диаграммы Исикавы [2].

Исследуемым параметром, который фиксировался на каждом выпускаемом изделии, является толщина панели перекрытия.

Работа в цеху организована посменно, соответственно изделия формируются разными рабочими, поэтому каждый раз фиксировалась дата формования изделия. Нами анализировался данный факт, как возможная причина дефектов при производстве.

Нумеровались отсеки кассет для того, чтобы можно было заметить наличие дефектов в определенных отсеках и предпринять меры по снижению брака в отдельных отсеках. Все записи велись строго последовательно, чтобы можно было верно анализировать карту «хода процесса».

По достижении количества выборок, равного 30, приступаем к расчету основных параметров контрольной карты Шухарта. Объем выборки для разных партий изделий может отличаться, но не более чем на 20% от среднего значения.

Для расчета данных величин используем программный комплекс Excel.

Доля несоответствующей продукции в рамках каждой выборки рассчитывается по формуле

$$P = \frac{N_{\text{брака}}}{V_{\text{выборки}}}, \quad (1)$$

где  $P$  – доля несоответствующей продукции в выборке;

$N_{\text{брака}}$  – количество несоответствующих единиц продукции в выборке;

$V_{\text{выборки}}$  – объем выборки.

Для анализа контрольной карты Шухарта необходимо также рассчитать среднюю долю несоответствующей продукции всего объема ( $P_0$ ) контролируемых изделий по формуле

$$P_0 = \frac{N_{\text{общ. брака}}}{V_{\text{общ. продукции}}}. \quad (2)$$

Верхняя и нижняя контрольные границы рассчитываются по формуле

$$UCL / LCL = P_0 \pm \sqrt{\frac{P_0 \cdot (1 - P_0)}{V_{\text{ср. выборки}}}}, \quad (3)$$

где  $UCL$  – верхняя контрольная граница;

$LCL$  – нижняя контрольная граница;

$V_{\text{ср. выборки}}$  – средний объем выборки.

При отрицательном значении  $LCL$  принимаем  $LCL = 0$ .

По рассчитанным параметрам строим контрольную карту Шухарта (рис. 1).

Из карты хода процесса, представленной на рисунке 1, мы видим:

1. Процесс не находится в состоянии статистического равновесия.
2. Максимальная доля наличия дефектов в кассете составляет 60%, а средняя доля – 26,5%, что неприемлемо при стремлении улучшить качество и снизить стоимость продукции.

Получив такие результаты, было решено составить причинно-следственную диаграмму Исикавы, для выявления возможных причин возникновения данного дефекта рисунок 2.

Таблица 1. – Расчет основных параметров для построения карты «хода процесса»

№ выборки	V выборки	№брака	P	UCL	LCL	P <sub>0</sub>
1	10	0	0	0,705424	0	0,264407
2	10	3	0,3	0,705424	0	0,264407
3	10	6	0,6	0,705424	0	0,264407
4	8	0	0	0,705424	0	0,264407
5	9	4	0,444444	0,705424	0	0,264407
6	10	5	0,5	0,705424	0	0,264407
7	10	6	0,6	0,705424	0	0,264407
8	8	3	0,375	0,705424	0	0,264407
9	10	5	0,5	0,705424	0	0,264407
10	9	0	0	0,705424	0	0,264407
11	10	1	0,1	0,705424	0	0,264407
12	9	0	0	0,705424	0	0,264407
13	10	2	0,2	0,705424	0	0,264407
14	8	1	0,125	0,705424	0	0,264407
15	9	1	0,111111	0,705424	0	0,264407
16	7	0	0	0,705424	0	0,264407
17	10	5	0,5	0,705424	0	0,264407
18	9	5	0,555556	0,705424	0	0,264407
19	10	5	0,5	0,705424	0	0,264407
20	10	5	0,5	0,705424	0	0,264407
21	7	3	0,428571	0,705424	0	0,264407
22	10	2	0,2	0,705424	0	0,264407
23	9	2	0,222222	0,705424	0	0,264407
24	10	2	0,2	0,705424	0	0,264407
25	9	1	0,111111	0,705424	0	0,264407
26	10	4	0,4	0,705424	0	0,264407
27	9	2	0,222222	0,705424	0	0,264407
28	9	1	0,111111	0,705424	0	0,264407
29	9	2	0,222222	0,705424	0	0,264407
30	9	0	0	0,705424	0	0,264407
31	9	1	0,111111	0,705424	0	0,264407
32	9	1	0,111111	0,705424	0	0,264407

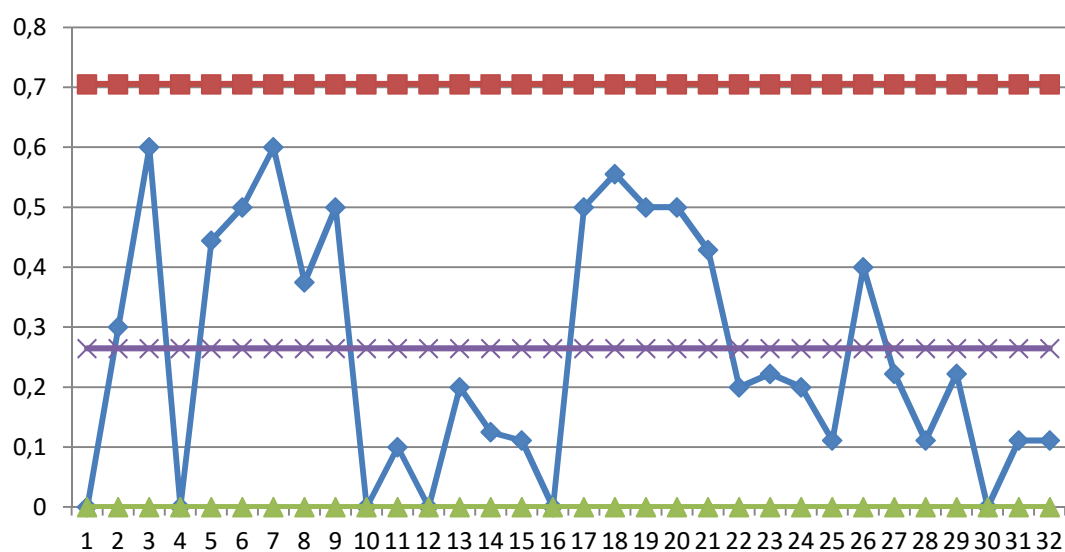


Рисунок 1. – Карта «хода процесса» до внесения изменений



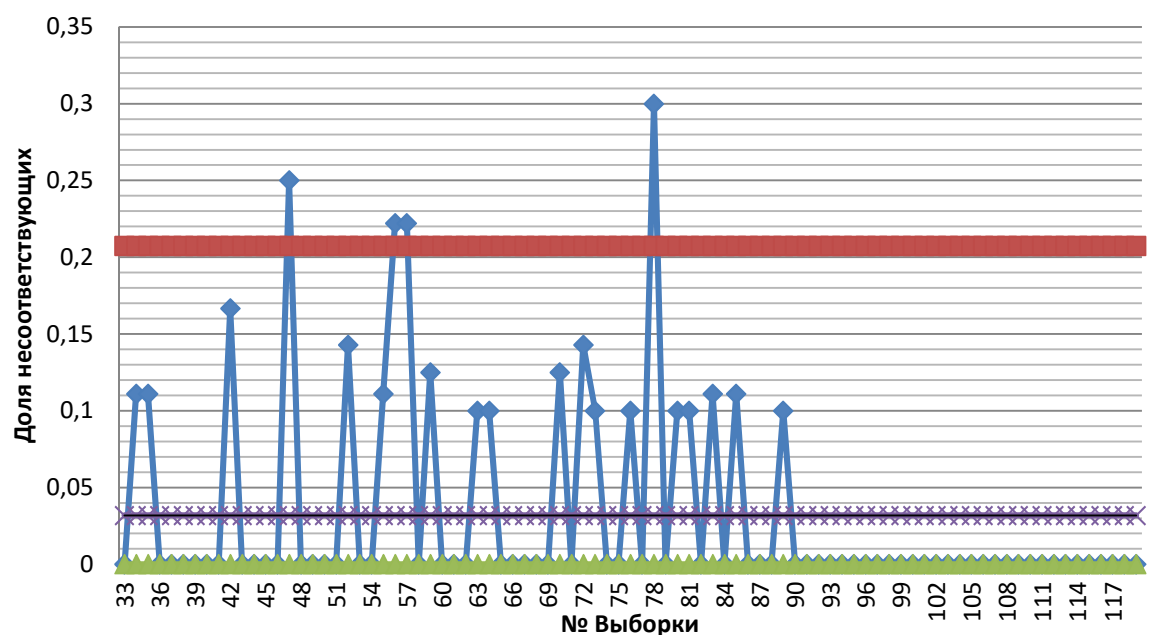
Рисунок 2. - Причинно-следственная диаграмма Исикавы

При более детальном анализе полученных в результате наблюдения данных и учитывая результаты построения диаграммы Исикавы, было определено, что резкое снижение дефектов присутствовало при начале работы каждой новой бригады рабочих. На производстве бригады меняются через каждые три дня. Данный факт был определен благодаря тому, что при сборе данных указывалась дата формования.

Но в ходе сбора данных было установлено, что при дальнейшей работе бригады количество дефектов росло. Мы предположили, что причиной может быть безответственное отношение к очистке форм (отсеков кассет) между формованиями в рамках трехдневной работы одной бригады. А снижение дефектов при смене бригад объяснялось тем, что рабочие должны передать формы, а также рабочее место в должном виде. Поэтому к очистке форм подходили более скрупулёзно [3].

Итак, было принято решение – внести изменение в процесс производства панелей перекрытия (обратить особое внимание рабочих и мастеров на очистку отсеков кассет). После внесения в рабочий процесс формования изделий дополнительных требований по культуре производства, обусловленной технологическими требованиями, мы продолжили сбор данных, чтобы установить, как изменилось качество выпускаемых изделий.

Получив данные по выборкам 33-89, снова просчитываем параметры контрольной карты Шухарта (рис. 3).



**Рисунок 3. – Контрольная карта Шухарта после внесения изменений в технологию изготовления изделий по очистке форм (выборки 33-89) и проведения ремонта и наладки оборудования (выборки 90-117)**

Как мы видим из рисунка 3, после внесения в рабочий процесс формования изделий дополнительных требований по культуре производства средняя доля дефектов снизилась до 5%, а максимальное их количество составило 30%. И, несмотря на то, что в выборке №78 точка находится выше верхнего контрольного предела, не нужно реагировать на данный скачок. Т.к. это особая причина вариации повлияла на данную выборку изделий, и оперативное реагирование на данную причину будет ошибочным, поскольку в данный момент процесс стабилен и при внесении изменений в процесс может последовать обратный эффект.

Убедившись, что процесс является стабильным, мы принимаем решение – произвести ремонт оборудования, это стало возможным благодаря временному снижению объемов производства.

После проведения ремонта и наладки оборудования (кассет) мы вновь собираем данные и строим контрольную карту Шухарта (выборки 90-117), для того, чтобы убедиться в положительном влиянии внесенных нами изменений в процесс производства панелей перекрытия.

По полученным данным и построениям, мы видим, что количество панелей, не попадающих в пределы допуска равно 0 (Рисунок 3, выборки 90-117).

Благодаря использованию статистических методов управления качеством мы достигли желаемого – толщина выпускаемых панелей перекрытия находится в допуске, определенном нормативной документацией. Процесс корректировки качества при производстве панелей перекрытий продолжается, и вносятся оперативные изменения по другому фактору – наличие выпуклостей на поверхности панелей.

Использование контрольных карт Шухарта позволило наглядно проследить за процессом, установить его стабильность, и проанализировать плюсы и минусы после введенных изменений. Причинно-следственная диаграмма Исикавы позволила установить возможные причины, влияющие на качество продукции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гиссин, В.И. Управление качеством продукции : учеб. пособие / В.И. Гиссин. – Ростов н/Д : Феникс, 2000.
2. Николаев, Н.С. Управление качеством : практикум / Н.С. Николаев. – М. : КНОРУС, 2016.
3. Гавриленко, А.Д. Применение контрольных карт Шухарта при производстве железобетонных панелей перекрытия / А.Д. Гавриленко, О.В. Голушкова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 291 с.

## ОСОБЕННОСТИ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ ПО УСТРОЙСТВУ РАБОЧИХ ШВОВ БЕТОНИРОВАНИЯ

Н.Л. Шпилевская, А.П. Шведов

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: n.shpilevskaya@psu.by, a.shvedov@psu.by

*Непрерывное бетонирование крупноразмерных габаритных конструкций не всегда может быть обеспечено. При производстве бетонных работ перерывы в бетонировании обусловлены как технологическими, так и организационными факторами. Но в организационно-технологической документации нет конкретных параметров и технологий устройства рабочих швов. Также отсутствует и нормативная документация по проектированию организации и производства работ по устройству этих швов.*

*Ключевые слова: рабочий шов, бетонная смесь, прочность бетона, опалубка, арматура.*

## PECULIARITIES OF NORMATIVE SUPPORT FOR DESIGNING ORGANIZATION AND PRODUCTION OF WORKS BY WORKING SEWING DEVICE CONCRETING

N. Shpilevskaya, A. Shvedov

Polotsk state university, Belarus

email: n.shpilevskaya@psu.by, a.shvedov@psu.by

*Continuous concreting of large-sized overall structures can not always be ensured. In the production of concrete work, breaks in concreting are due to both technological and organizational factors. But in the organizational and technological documentation there are no specific parameters and technologies for the device of working seams. Also there is no normative documentation on the design of the organization and production of work on the construction of these joints.*

*Keywords: working seam, concrete mixture, concrete strength, formwork, reinforcement.*

Возводимые массивные бетонные и железобетонные конструкции, как правило, бетонируются отдельными участками. При этом стремятся к сокращению площади рабочих швов, требующих больших затрат труда и снижающих монолитность конструкции в целом. Устройство рабочих швов вызвано неизбежными остановками бетонирования из-за всевозможных организационных (окончание рабочей смены, поломка оборудования, нехватка материалов и т.п.) и технологических причин (необходимость монтажа вышележащей арматуры, перестановка лесов и опалубки, ограничение нагрузок на поддерживающие конструкции и т.п.).

Несмотря на актуальность вопроса по изучению работы технологических швов /1/ в настоящее время проведено недостаточно исследований в данном направлении. Авторы работы /2/ пришли к заключению о том, что требуется подробное изучение работы конструкции, которая выполнена с рабочими швами бетонирования, поскольку существенно ухудшаются прочностные и жесткостные характеристики возводимого конструктивного элемента, выполненного со швом, в то время как при реальном проектировании монолитные здания рассчитываются как цельномонолитные, без швов. Тем более что при этом нет возможности при проектировании предвидеть фактические места, где будет устроен рабо-



чий шов. Несмотря на четкое указание в российских строительных нормах по технологии выполнения рабочих швов, большинство организаций однако не соблюдают правильную технологию бетонирования элементов, вследствие чего, характеристики конструкции ухудшаются, поскольку величина сцепления нового бетона со старым значительно ниже, чем монолита. Результаты проведенных авторами испытаний четко указывают на необходимость обязательного соблюдения технологии выполнения конструкции рабочего шва, которая регламентирована в нормативе /3/.

Идеальное положение шва бетонирования должно совпадать с положением нулевой поперечной силы в конструкции, т.е. шов устраивается в месте, где поперечная сила минимальна, а лучше - равна нулю. Это определяется по результатам расчета - по эпюре поперечных сил. Рабочий шов показывается линией на плане с выноской «Рабочий шов бетонирования», дается его привязка к осям здания. При этом не дается конкретных указаний по его устройству.

Во избежание образования не предусмотренных проектом рабочих швов в плите (наклонных и горизонтальных), снижающих прочность плиты, необходимо выбрать такой способ и темп бетонирования, чтобы каждый блок (захватка) был полностью забетонирован в требуемое время без недопустимых перерывов в бетонировании. Допустимый разрыв во времени при бетонировании соседних блоков (захваток) устанавливается ППР. Укладка бетонной смеси после перерывов в бетонировании допускается после приобретения уложенным бетоном прочности не менее  $15 \text{ кг/см}^2$ .

Бетонирование плиты следует производить непрерывным способом в пределах отдельных блоков (захваток), по границам которых устраиваются рабочие швы. Согласно нормативу /4/, действующему в России, при выполнении работ по армированию фундаментной плиты в местах рабочих швов по границам блоков (захваток) бетонирования, определенных в технологической карте, устанавливается внутренняя опалубка, которая изготавливается в виде стальной сетки из проволоки диаметром 1–1,1 мм с размером ячеек не более  $5 \times 5 \text{ мм}$  (рисунок 1). Перед установкой и бетонированием сетка должна быть обезжирена для обеспечения сцепления с бетоном. Сетки устанавливаются вертикально и крепятся вязальной проволокой к стержням нижней и верхней арматурных сеток плиты по линии рабочих швов. При толщине плит более 0,6 м сетки во избежание выпучивания усиливаются вертикальными, а при необходимости и горизонтальными арматурными стержнями, места расположения и диаметр которых должны быть указаны в ППР.

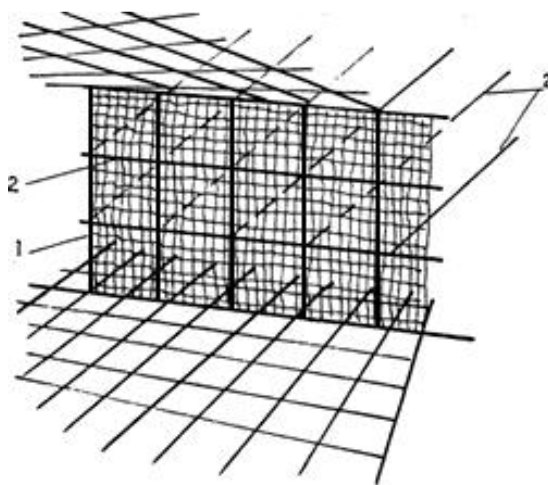


Рисунок 1. – Внутренняя опалубка рабочего шва плиты:  
1 – вертикальные стержни усиления; 2 – горизонтальные стержни усиления

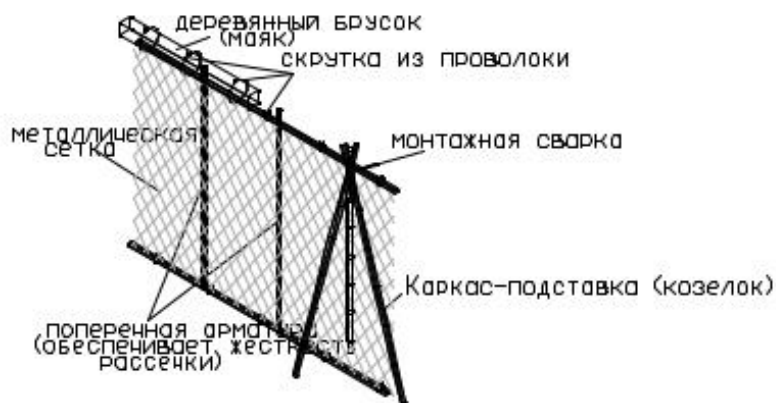


Рисунок 2. – Устройство разделительной сетки

При выполнении арматурных работ по границам блоков (захваток) устанавливают вертикальные металлические сетки (отсечки) для образования рабочих швов (рис. 2). На заключительной стадии работ устанавливают маяки для контроля вертикальной отметки верха плиты в процессе укладки бетонной смеси.

При укладке бетонной смеси в массивные густоармированные плиты большой площади (фундаментные плиты, днища резервуаров и отстойников и др.) согласно типовым технологическим картам, основным технологическим требованием является непрерывность укладки на всю высоту плит. Для обеспечения непрерывной укладки смеси на всю высоту плиту разбивают на блоки без разрезки арматуры (рис.) с ограждением блоков металлическими сетками.

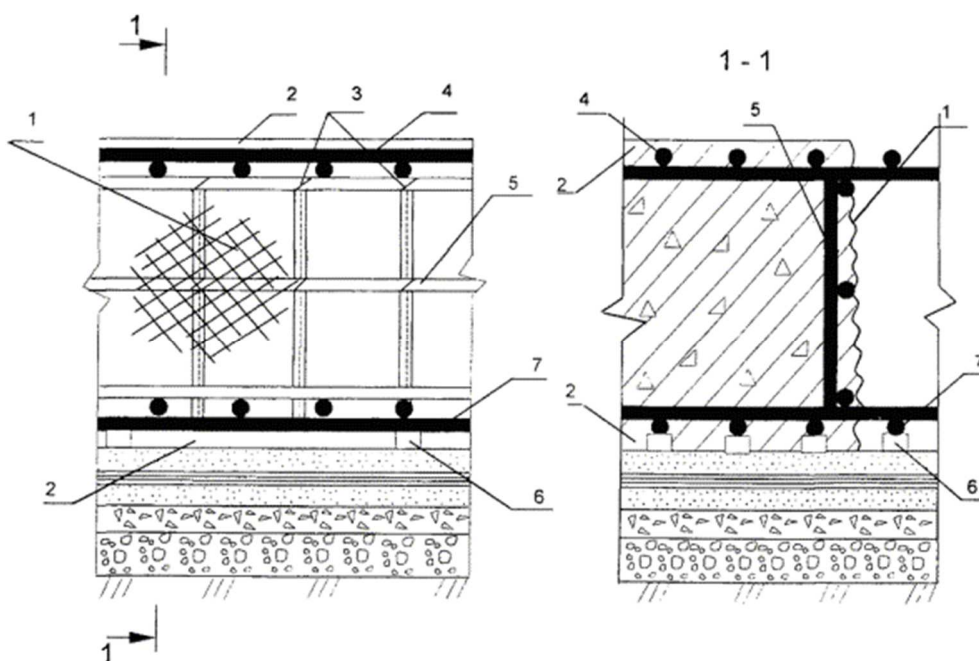


Рисунок 3. – Конструкция рабочего шва:

1 – металлическая сетка; 2 – защитный слой бетона; 3 – места крепления сетки вязальной проволокой; 4 – верхняя арматура; 5 – плоский поддерживающий каркас; 6 – пластмассовые фиксаторы; 7 – нижняя арматура

Сетка остается в теле плиты. Цементное молоко, проникшее через ячейки и образующее наплыв в зоне шва, зачищают. Остатки мусора смывают водой или воздушной струей из компрессора.

Однако в нормах обезжиривание и зачистка сеток не приводится. Не ясно, каков при этом состав звена рабочих и какое время затрачивается.

Смонтированная и подготовленная к бетонированию опалубка должна быть принята по акту. При этом отклонения плоскостей опалубки от вертикали не должны превышать 5 мм на 1 м высоты; смещение осей опалубки от проектного положения – 10 мм; местные неровности при проверке двухметровой рейкой – 3 мм. В процессе бетонирования необходимо вести непрерывное наблюдение за состоянием опалубки и креплений, своевременно предотвращая деформации опалубки.

При послойной укладке бетонной смеси /5/ на рабочий шов, имеющий на поверхности цементную пленку вместо ожидаемой по проекту монолитной, образуется трехслойная конструкция: «бетон – цементная пленка – бетон» этой конструкции с точки зрения прочности слабым местом является именно цементная пленка. При пороговом напряжении, значение которого значительно ниже расчетного, разрушение бетонной конструкции произойдет именно по этой границе раздела. В случае «трехслойной» конструкции здание возможно рассматривать не как монолитную конструкцию, а как сборную, состоящую из «этажей», каждый из которых самостоятельно воспринимает механическую нагрузку и работает независимо от других.

Прочность бетонного основания согласно /3,6/ при очистке от цементной пленки должна составлять не менее:

0,3 МПа – при очистке водной или воздушной струей;

1,5 МПа – при очистке механической металлической щеткой;

5,0 МПа – при очистке гидropескоструйной или механической фрезой.

В действующих нормах нет указаний по очистке от цементной пленки. Остается неясным, каков при этом состав звена рабочих и какое время затрачивается на данную работу.

При каждом методе укладки бетонной смеси должно быть соблюдено основное правило – новая порция бетонной смеси должна быть уложена до начала схватывания цемента в ранее уложенном слое. Однако существующие методики /7–13/ определения сроков схватывания цементных систем имеют недостатки и в них нет однозначного определения термина явления начало и конец схватывания.

В результате анализа технологических карт на бетонирование железобетонных плит /14–16/, выяснено, что существующие нормативные документы, по которым составляются технологические карты на бетонирование, не учитывают важный фактор – время на устройство рабочих швов, возникающих при перерывах в бетонировании.

В нормах не приводятся конкретных указаний и рекомендаций по этой работе. В состав работ на укладку бетонной смеси в конструкции массивов краном в бадьях, бетононасосами, согласно НЭТ, сб.4 /12/ входит: 1. Прием бетонной смеси. 2. Укладка бетонной смеси непосредственно на место. 3. Разравнивание бетонной смеси с частичной перекидкой. 4. Уплотнение вибраторами. 5. Заглаживание открытой поверхности бетона. 6. Перестановка вибраторов.

Состав звена: бетонщик 3 разряда – 1, бетонщик 2 разряда – 1.

Затраты труда составляют 2,2–4,1 чел.-ч в зависимости от объема подаваемой бетонной смеси.

При продолжительных перерывах необходимо устраивать рабочие швы в соответствии с действующими ТНПА /6, 17/. Однако в нормах РБ не приводятся конкретных указаний и рекомендаций по этой работе, нет нормативного обеспечения на технологию устройства рабочих швов /18/.

Таким образом, вопрос проектирования организации и производства работ по устройству рабочих швов остается непроработанным в настоящее время.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Eisenberger, M. Finite beams on infinite two-parameter elastic foundations / M. Eisenberger, J. Bielak // Computers & Structures. –1992. – Vol. 42, no. 4. – P. 661–664.
2. Коянкин, А.А. Влияние шва бетонирования на работу конструкции / А.А. Коянкин, В.И. Белецкая, А.И. Гужевская // Вестник МГСУ. – 2014. – № 3. – С. 76–81.
3. Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции : СП 70.13330.2012. – Введ. 01.07.2013. – М. : Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 (с изм. N 1), 2013. – 293 с.
4. Указания по устройству фундаментов на естественном основании при строительстве жилых домов повышенной этажности : ВСН 37-96. – Введ. 01.01.1997. – М. : НИИМосстрой, 1997. – 21 с.
5. Проблема холодных швов – химическое фрезерование бетона [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: <http://zadobavkoj.ru/stati/37-reshenie-problemy-holodnogo-shva.html> – Дата доступа: 12.02.2018.
6. Монолитные бетонные и железобетонные конструкции. Правила возведения : ТКП 45-5.03-131-2009. – Введ. 14.04.2009 (с отменой на территории Республики Беларусь раздела 2 СНиП 3.03.01-87). – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь : РУП «Стройтехнорм», 2009. – 24 с.
7. ASTM C 266 Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles. Current Edition Approved. Published 2007.
8. ASTM 191 Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. Current Edition Approved. Published 2007.
9. ASTM C 150, Standard Specifications for Portland Cement. Current Edition Approved. Published 2007.
10. CSA CAN 3-A5 Current Edition Approved .Published 2007.
11. BS 12:1978 Specification for ordinary and rapid-hardening Portland cement. Current Edition Approved June 30, 1978. Published June 1978.
12. Смеси бетонные. Метод определения сроков схватывания : ГОСТ 56587-2015. – Введ. 01.04.2016. – М. : Стандартиформ, 2015. – 11 с.
13. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема . ГОСТ 310.3-76. (с изм. № 1 от 01.01.1985). – Введ. 01.01.1978. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – С. 6.
14. Технологическая карта на устройство монолитной железобетонной фундаментной плиты : 7351 ТК. – Введ. 02.02.2002. – М. : ПКТИпромстрой, 2002. – 15 с.
15. Технологическая карта на устройство плоских монолитных железобетонных фундаментных плит в зданиях и сооружениях общего назначения при толщине плиты до 1200 мм : ТК 4.01.01.63. – Введ. 01.02.1989. – М. : Промстройпроект Госстроя СССР, 1989. – 14 с.
16. Устройство плоских монолитных железобетонных фундаментных плит в гражданских зданиях : ТК 6306031077/31077. – Введ. 01.03.1991. – М. : Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт организации, механизации и технической помощи строительству. 1991. – 13 с.
17. Монолитные каркасные здания. Правила возведения : ТКП 45-5.03-20-2006. – Введ. 03.03.2006. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2006. – 56 с.
- Монтаж сборных и устройство монолитных железобетонных конструкций : НЗТ, сб.4. – Введ. 22.06.2009. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь : Стройэкономика, 2009. – 97 с.

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ ПЛАНИРОВАНИИ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Е.И. Кисель, Л.Г. Срывкина

Брестский государственный технический университет, Беларусь

email: eleniva2006@mail.ru, lgsryvkina@mail.ru

*Дана характеристика роли и основных особенностей оперативного планирования строительного производства. Представлены результаты исследования систем оперативного планирования строительных организаций на основе анкетирования. Выявлены недостатки, связанные с отсутствием в организациях четкой информационной системы, позволяющей поддерживать принятие оперативных решений. Сформулированы требования к составу информационной базы оперативного планирования и к формированию соответствующих информационных систем, направленных на достижение целей проектов и целей развития организаций.*

*Ключевые слова: оперативное планирование, организация, проект, система, цель, решения, информация, подготовка, анализ.*

## INFORMATION SUPPORT FOR DECISION-MAKING IN CONSTRUCTION OPERATIONAL PLANNING

A. Kisel, L. Sryukina

Brest state technical university, Belarus

email: eleniva2006@mail.ru, lgsryvkina@mail.ru

*The article describes the role and main features of construction operational planning. The results of the research of construction company's operational planning systems on the questionnaire basis are presented. The shortcomings associated with the absence in the companies of a clear information system, which allows supporting the of operational decisions adoption are identified. Requirements are formulated for the operational planning information base composition and for the formation of appropriate information systems aimed at achieving the goals of the projects and development goals of the companies.*

*Keywords: operational planning, organization, project, system, goal, solutions, information, preparing, analysis.*

Оперативное планирование в строительстве является важным инструментом, обеспечивающим рост качества, формирование необходимой конкурентной позиции, оптимизацию ресурсов и затрат. Менеджмент оперативных процессов является основой сбалансированных управленческих решений, учитывающих интересы всех участников строительства. Несмотря на достаточный опыт оперативного планирования, строительные организации испытывают на себе влияние сбоев, отклонений и рисков. Это связано с отсутствием систематизации всех уровней планирования, подчиненности их общим целям. Исследование систем оперативного планирования на основе анкетирования позволило выделить ряд недостатков, которые связаны с отсутствием в организациях четких информационных систем, поддерживающих принятие оперативных решений. В статье сформулированы требования

к созданию подобных систем, к составу информационной базы оперативного планирования, ориентированной на достижение целей строительных проектов и целей развития организаций.

Оперативное планирование строительного производства выполняет двойственную функцию. С одной стороны, оно является частью комплексной системы планирования строительной организации, с другой стороны, - функцией оперативного управления строительным производством. Оперативное управление представляет собой управленческую деятельность, ограниченную определённым временным интервалом – месяцем, неделями, сутками, позволяющую воздействовать на отклонения от установленных текущим (годовым или квартальным) планом заданий.

Оперативное планирование отличается от перспективного и текущего планирования следующими особенностями:

- осуществляется без пересмотра целей функционирования системы управления;
- предназначено для возврата системы на траекторию движения к цели, сформированную при текущем планировании;
- основывается на данных о действительном состоянии объектов и наличии ресурсов в системе на начало планируемого периода, то есть информация для принятия решений является достаточно точной, вероятностная составляющая сводится к минимуму;
- временной период для обработки информации и принятия решений является очень ограниченным;
- требуется чёткая координация работы всех подразделений строительной организации по сбору исходных данных и доведению оперативных планов до непосредственных исполнителей.

В советское время в условиях плановой экономики значительное внимание уделялось внедрению единой системы подготовки строительного производства, включающей следующие подсистемы: общую подготовку строительного производства, подготовку генподрядных строительных организаций, подготовку к строительству объектов. Руководство по единой системе подготовки строительного производства, разработанное в 1979 году, рассматривало организацию контроля и оперативного планирования строительно-монтажных работ в качестве одного из элементов подготовки строительства объектов. Цель позиционировалась как «обеспечение поточности, ритмичности и непрерывности выполнения работ, а также наиболее полное использование материально-технических и трудовых ресурсов на объекте строительства» [1, с. 13].

Активно развивалась методическая база оперативного управления и планирования. В 1981 году ВНИПИ труда в строительстве разработал «Методическое руководство по оперативно-производственному планированию в строительных организациях с применением ЭВМ» [2], где представлен ряд методов автоматизированной разработки оперативных планов. Проблемам оперативного управления и планирования посвящены исследования советских учёных Куликова Ю.А., Хибухина В.П., Величина В.З., Втюрина В.И., Зильбермана М.Б., Безлюдова А.Л., Небритова Б.Н., Васильева В.М., Зеленцова Л.Б., Немчина А.М., Швецова Ю.В., российских – Буркова В.В., Новикова Д.А., Коновальчука Е.В., Матвеева А.А., Цветкова А.В., Колосовой Е.В. и других.

Сегодня единой нормативной базы оперативного планирования не существует. Это совершенно оправдано переходом к новым условиям хозяйствования, большим разнообразием организационно-правовых форм строительных организаций, различиями в их производственных структурах и организационных структурах управления, растущей сложно-

стью объектов строительства, различными схемами реализации инвестиционных проектов, усложняющимися взаимосвязями между их участниками. При этом требования к соблюдению сроков, бюджета, качества при строительстве объектов, поддержанию и повышению конкурентного потенциала строительных, девелоперских и инженерных организаций также растут. В таких условиях важным инструментом для создания устойчивой среды деятельности организации является внедрение эффективной системы оперативного управления, включающей подсистемы оперативного планирования, организации, учёта, контроля и анализа.

В 2017 году авторами выполнено исследование систем планирования тринадцати строительных организаций Брестской и Гродненской областей различных форм собственности путём анкетирования работников аппарата управления. Результаты обработки анкет представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты анкетирования «Исследование систем оперативного планирования строительных организаций»

Исследуемый показатель	Частота ответов, %		
	«да»	«нет»	«частично»
Наличие на предприятии плановых отделов (служб)	77,8	22,2	0,0
Используемые схемы планирования:			
- «сверху вниз»	38,5	61,5	0,0
- «снизу вверх»	0,0	100,0	0,0
- «смешанная»	61,5	38,5	0,0
Горизонт планирования:			
- долгосрочное (10 и более лет)	0,0	100,0	0,0
- среднесрочное (3-5 лет)	69,2	30,8	0,0
- краткосрочное (от 1 года до 1 суток)	100,0	0,0	0,0
Осуществление анализа исходной плановой информации	81,8	0,0	18,2
Применение внутрифирменных методик планирования отдельных показателей деятельности	58,3	41,7	0,0
Наличие кадрового потенциала в области планирования	69,2	23,1	7,7
Использование специализированных программных продуктов при разработке планов (указать наименования)	7,7	92,3	0,0
Наличие эффективного внутрифирменного планирования	46,2	30,8	23,0
Использование оперативного планирования:			
- месячного	92,3	7,7	0,0
- недельно-суточного	76,9	23,1	0,0
Сферы применения месячного планирования:			
- производство	84,6	15,4	0,0
- материальное обеспечение	84,6	15,4	0,0
- механизация и транспорт	61,5	38,5	0,0
Сферы применения недельно-суточного планирования:			
- производство	61,5	38,5	0,0
- материальное обеспечение	61,5	38,5	0,0
- механизация и транспорт	76,9	23,1	0,0
Применение определенных форм оперативных планов			
- месячных	69,2	30,8	0,0
- недельно-суточных	46,2	53,8	0,0

Анализ результатов позволил выявить следующее. В организационной структуре управления строительных организаций, как правило, выделяются специализированные подразделения для осуществления функции планирования (77,8 % случаев). Преобладающей схемой планирования (61,5 %) является смешанная. Она подразумевает работу руководителей различных уровней управления в режиме диалога, направленного на выработку сбалансированных решений, которые учитывают как интересы организации в целом, так и возможности отдельных её подразделений. Эффективными системы планирования своих организаций считают 46,2 % опрошенных.

Ни в одной из исследованных организаций не осуществляется долгосрочное стратегическое планирование, среднесрочное реализуется в 69,2 % организаций. При этом все организации уделяют внимание краткосрочному планированию.

Большинство опрошенных (81,2 %) отметило выполнение анализа исходной плановой информации в своих организациях. Одной из задач оперативного управления является уменьшение вероятности отказов и их негативных последствий (снижения эффективности строительного производства) в течение всего периода производства работ. Менеджмент оперативных процессов посредством грамотного оперативного планирования позволяет предотвратить (минимизировать) возникновение несоответствий требованиям заинтересованных сторон-участников. Но при этом зачастую (41,7 % случаев) в организациях не выработаны определённые методики обработки (анализа) указанных данных и планирования отдельных показателей деятельности.

То же касается и форм представления оперативных планов. Более чем половина опрошенных организаций применяет недельно-суточное планирование: 61,5 % в сфере производства работ и материального обеспечения, 76,9 % при планировании механизации и транспортного обслуживания. При этом в 53,8 % случаев не используются определённые формы планов. Вместе с тем следует отметить, что подходы к формированию показателей, входящих в оперативные планы, форм планов также меняются. Эта трансформация происходит на основе эволюции оперативного управления. До середины XX века активно использовались показатели с учетом резервов времени и производственных ресурсов. В результате часть производственного потенциала оставалась не востребованной и формировалась с целью реагирования на производственные сбои. Во второй половине XX века в основу составления плановых показателей закладывали вероятность возникновения потенциальных отказов строительных систем. Что сразу потребовало интенсификации управленческих усилий, так как оперативный контроль необходимо обеспечивать по всем процессам с высокой вероятностью отклонений. На современном этапе основой для формирования оперативных планов являются цели проекта, долгосрочные цели организации, чему внимание почти не уделяется. Приоритетным в этом случае является не выполнение отдельного планового показателя, а анализ последствий отклонений (влияние на поставленную долгосрочную цель или систему целей).

В строительном производстве невозможно обойтись без различного рода сбоев. Это связано с рядом особенностей производства и самой продукции строительства. Однако важно при составлении оперативных планов обеспечить приемлемый уровень риска для достижения поставленных целей. Это возможно только на основе построения глубокой и постоянно действующей системы информационной поддержки принятия оперативных решений. Система должна включать процессы идентификации, анализа и оценивания результатов. Эти этапы должны быть четко прослеживаемы в управленческой деятельности. При этом в обязательном порядке должна быть сформирована информационная основа подготовки планирования и анализа планов до момента их реализации (таблица 2).



Таблица 2. – Информационная основа подготовки и анализа планов

Подготовка планов
<ul style="list-style-type: none"> <li>– ожидаемые преимущества, результаты (в соответствии с целями)</li> <li>– необходимые ресурсы (с учетом приоритетов целей)</li> <li>– сроки (с учетом их влияния на приоритеты целей)</li> <li>– распределение ответственности между всеми участниками (матрица ответственности)</li> </ul>
Анализ планов
<ul style="list-style-type: none"> <li>– этапы анализа</li> <li>– средства и методы анализа</li> <li>– области анализа</li> <li>– перечень результатов (ориентированных на цели всех уровней управления)</li> <li>– форма отчетов по результатам анализа</li> <li>– варианты управленческих решений</li> <li>– выделение ключевых результатов в общую систему оперативного управления</li> <li>– форма журнала ошибок и значимых отклонений, их влияния на цели</li> </ul>

Особое внимание обращает на себя тот факт, что организации не применяют специализированные программные продукты при планировании. Только в одной из опрошенных организаций зафиксировано применения информационной системы управления проектами MS Project и только с целью разработки базовых планов, без осуществления функций отслеживания хода реализации проектов, анализа освоенных объёмов, прогнозирования сроков и затрат по завершении.

С одной стороны, это снижает качество вырабатываемых оперативных решений, что сказывается на эффективности деятельности организации в целом. Для поддержки принятия решений не применяются специальные методы обработки данных, прогнозирования результатов реализации проекта. С другой стороны, в условиях активного внедрения технологий информационного моделирования (BIM) во многих странах, переходу к «безбумажной строительной площадке» может существенно снизиться конкурентный потенциал белорусских организаций, и они будут вытеснены со своего же рынка. В Беларуси начинается план внедрения технологии информационного моделирования на всех этапах жизненного цикла объекта строительства [3]: предпроектные проработки, проектирование, строительство, эксплуатация (таблица 3).

Таблица 3. – Состав информационной базы оперативного планирования

Месячные планы	Недельно-суточные планы
1	2
Постоянная (условно-постоянная) информация	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– текущие годовые и (или) квартальные производственно-экономические планы строительной организации</li> <li>– данные договоров с заказчиками и субподрядчиками</li> <li>– проекты производства работ</li> <li>– внутрипроизводственные нормативы оперативного планирования</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– оперативные месячные планы</li> <li>– проекты производства работ (календарные графики, технологические карты)</li> <li>– комплектующие ведомости по объектам</li> <li>– планы-графики выпуска подсобными производствами комплектов строительных материалов, изделий и конструкций</li> <li>– годовые графики режимов работы строительных машин с учётом планового ремонта</li> </ul>

Окончание таблицы 2

1	2
Переменная информация	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– информация об ожидаемом состоянии работ на объектах на начало планируемого периода</li> <li>– информация о возможности обеспечения строящихся объектов необходимыми ресурсами: об имеющейся численности рабочих кадров и её изменении в планируемом периоде; о поставках, отгрузке, нахождении в пути, о наличии на приобъектных складах строительных материалов; о наличии и возможности получения или аренды строительных машин в планируемом периоде</li> </ul>	
Требования к пополнению и систематизации информационной среды	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– постоянное накопление информации каждым исполнителем в соответствии с уровнем ответственности (матрица ответственности)</li> <li>– разработка корпоративной методики использования накопленной информации</li> <li>– преимущества повторного использования в целях управления</li> <li>– оптимизация затрат на создание и поддержание записей</li> <li>– конфиденциальность информации и разработка системы доступа исполнителей разного уровня</li> <li>– потребности, связанные с особенностями строительных процессов</li> <li>– утверждение сроков хранения информации</li> </ul>	

Он включает переход к обязательному применению BIM-технологий (в том числе на этапе возведения) при строительстве объектов, финансируемых с привлечением бюджетных средств, а также жилых домов: с января 2020 года – относящихся к первому классу сложности по СТБ 2331, с января 2022 года – всех остальных. Результаты анкетирования говорят о том, что подавляющее большинство строительных организаций Брестской и Гродненской областей к этому не готово

С учётом особенностей оперативного планирования и характеристик необходимой для него информации (таблицы 2, 3) сформулируем **требования к созданию эффективной системы оперативного планирования в строительной организации:**

**1. Внедрение единой информационной системы мониторинга** – сбора данных о текущем состоянии и формирования отчётов по затратам, срокам, качеству работ на каждом объекте.

Поскольку часть информации для оперативного планирования носит переменный характер, важным аспектом является мониторинг – контроль и оценка информации о ходе строительства объектов. В случае реализации больших проектов контроль «требует той или степени формального подхода», «делает работников подотчётными, предотвращает разрастание небольших проблем в крупные» [4, с. 550]. Формализация предполагает чёткое определение состава контролируемых параметров (наименований, единиц измерения, требований к точности измерения), субъектов контроля, частоты контроля и формы представления результатов (отчётов).

**2. Разработка плана коммуникации.** Зачастую необходимая информация в той или иной форме существует, но не доводится до заинтересованных внешних и внутренних сторон вовремя, в силу чего теряет актуальность; в отдельных случаях сбор и обработка данных может дублироваться разными подразделениями организации. Целью плана коммуникации является сокращение потоков информации и своевременное информирование заинтересованных сторон по всем аспектам хода строительства объектов. План коммуникаций может быть составлен в табличной форме или графической форме и давать ответы на вопросы о том, какая информация, когда, каким способом (электронная почта, документ, совещание), кем и кому должна передаваться.

**3. Разработка определённых форм оперативных планов.** Как свидетельствует анкетирование, во многих организациях оперативное планирование носит «стихийный» характер. В одном месяце план может быть устно озвучен на совещании, в другом - зафиксирован в виде перечня показателей (номенклатура может меняться от месяца к месяцу), в третьем - представлен в форме таблицы и т. д. Необходимо систематизировать показатели оперативных планов для разных структурных подразделений организации. Планы должны включать сроки, действия, принимаемые решения, обозначать ответственных лиц по идентификации оперативных сбоев. Это позволит эффективно работать единой системе мониторинга и плану коммуникаций.

**4. Внедрение планов обработки оперативных сбоев.** Так как оперативное планирование часто носит стихийный характер, система идентификации оперативных сбоев и дальнейшего анализа последствий носит такой же стихийный характер. В результате теряется ценнейшая информация о результатах их устранения, последствиях и результатах. Планы должны содержать ожидаемые риски, мероприятия по их минимизации или устранению, ограничения, периодичность контроля, перечень исполнителей, степень и характер остаточного риска.

**5. Разработка внутрифирменных нормативов оперативного планирования.** Это касается как численных показателей, учитывающий достигнутый в организации уровень производительности труда, использования техники, так и наборов стандартных действий в часто возникающих ситуациях. Это позволит принимать решения и разрабатывать планы в максимально сжатые сроки. Необходимо сформировать области применения, функции, требования, ожидания, средства управления, рекомендуемые действия.

**6. Использование информационных систем управления проектами,** позволяющих осуществлять календарное и ресурсное планирование, отслеживание хода реализации каждого проекта, автоматическое составление прогнозов по срокам и стоимости.

Грамотно спроектированная информационная среда должна стать неотъемлемой частью оперативного планирования, встраиваться в деятельность в целом и в отдельные производственные процессы, существенно влиять на достижение поставленных целей. Эффективное оперативное планирование должно обеспечить основу для формирования концепции управления «планируй-делай-проверяй-оценивай-действуй».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по единой системе подготовки строительного производства / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1979. – 31 с.
2. Методическое руководство по оперативно-производственному планированию в строительных организациях с применением ЭВМ / ВНИПИ труда в строительстве. – М. : Стройиздат, 1981. – 183 с.
3. О внедрении технологии информационного моделирования : приказ Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 16 марта 2018 г., № 70.
4. Ларсон, Эрик У. Управление проектами : учебник / Эрик У Ларсон, Клиффорд Ф. Грей ; пер. В.В. Дедюхина. – Изд. 5-е, перераб. – М. : Дело и Сервис, 2013. – 784 с.

**ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ И ПРИРОДООХРАННЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ  
В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

УДК 504:628.1

**УРОВНИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ  
В УСЛОВИЯХ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ОМАГНИЧЕННОЙ ВОДЫ**

*Н.Е. Журавская*

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Украина

email: nzhur@ua.fm

*Двухуровневый индикаторный контроль за процессами омагничивания воды в системах теплоснабжения рассматривается как механизм аддитивной функции процесса омагничивание воды.*

*Ключевые слова: безреагентная обработка воды, эколого-техногенное оценивание, индикаторы.*

**LEVELS OF FUNCTIONAL ORDERING OF HEAT SUPPLY SYSTEMS UNDER CONDITIONS  
OF RECEIVING AND APPLICATION OF MAGNETIC WATER**

*N. Zhuravska*

Kyiv national university of construction and architecture, Ukraine

email: nzhur@ua.fm

*Two-level indicator control over the processes of water magnetization in heat supply systems is considered as a mechanism of the additive function of the process of magnetizing water.*

*Keywords: non-reagent water treatment, ecological and technogenic assessment, indicators.*

По своим структурно-функциональным особенностям технологии подготовки технической воды в системах теплоснабжения относится к современным нанотехнологиям [1, 2]. В предыдущих исследованиях [1] установлена высокая эффективность безреагентной обработки воды в электромагнитных полях в системах теплоснабжения; достигнуто экономия природных (на 10%) и энергоресурсов (на 33%) благодаря созданной технологии обработки воды; обеспечено упорядоченность по массообмену процесса омагничивания воды [1] и соответствующему инженерному оформлению [3, 4]; произошло улучшение стабильности работы установки (1...2% в год потенциально возможных неполадок и то, связанных с независимыми от нас причинами, например отключение электроэнергии на локальном уровне и т.д.). Полученные преимущества безреагентной технологии воды в системах теплоснабжения, связанные, в первую очередь предложенной научной концепцией процесса омагничивания воды, которая стала основной реализацией идеи в практических условиях на уровне пилотных испытаниях, а затем включение в проектную документацию строительных объектов, в системе которых есть производственные подразделения с системами теплоснабжения. В дальнейшем эффективность эксплуатации таких установок зависит непосредственно от

управленческих решений относительно определенных производственных процессов (система экологического менеджмента промышленно-производственных объектов). Одним из путей действенных управленческих решений является правильно организованный контроль за технологией обработки воды с применением интегральных систем индикаторов в условиях возможности их количественной идентификации удельных показателей относительно определенных параметров подготовки технической воды в системах теплоснабжения. В то же время, эти процессы контроля недостаточно изучены несмотря на то, что научные разработки технологии омагничивания технической воды имеются не только на Украине [5], но и за рубежом: в Беларуси, Германии, США [6–8].

Концептуальной основой индикаторов стран Организации экономического сотрудничества, есть три фактора, которые совпадают с требованиями ООН: экологические, экономические и социальные, обеспечивающие интегральный контроль производственной деятельности в этих сферах [9, 10]. В самой концепции отмечается, что все они подаются, как равноправные составляющие интегральной системы, без указания их соподчиненность при решении тех или иных производственных процессов в системе «намерения – упорядоченность технологического производственного процесса - результаты и последствия этих намерений». На наш взгляд, это является существенным недостатком технологии индикаторного контроля производственных процессов. Вероятно, это связано с экологической направленностью создания индикаторов контроля том, что создано их 60% от общего числа. Сам факт создания индикаторов контроля за состоянием окружающей среды не вызывает сомнения, опираясь на существующие ситуации постоянного прогрессирующего качественного истощения природных систем [11]. Но при этом следует отметить, на наш взгляд, что состояние окружающей природной среды обусловлено не рациональным использованием природной среды в связи с техногенным воздействием определенных видов производственной деятельности. Поэтому, в первую очередь, было обращено внимание на разработку индикаторов по состоянию окружающей среды, среди разработанных проектов индикаторов их насчитывается 60% от общего количества. Такого же мнения придерживается Шитиков [12], рассматривая эти вопросы в рамках различной степени экологической иерархии природных систем (природные - природно-техногенные). Положительным является тот факт, что идентификаторы контроля создаются по системному принципу, что позволяет определять структурно-функциональные изменения в техногенно-измененных водных системах. Но, подчеркивая положительный факт роли индикаторного контроля и возможностей определения техногенных воздействий на гидро-экосистемы, авторы не связывают эти изменения с производственными процессами, которые являются индикатором этих изменений. Это является основным недостатком направлении создания индикаторов по системным подходам.

В работе [13] также высказывается мнение по контролю за производственными процессами с учетом техногенных и экологических опасностей, но отсутствуют методические подходы к решению этого вопроса, что и является недостатком данного технического решения.

Заслуживает внимания [14] высказывания авторов, что промышленный экологический менеджмент и механизмы его реализации должны постоянно получать системную информацию «экономика - производство - природа», связанные с формированием техногенных и экологических опасностей промышленных технологических процессов. В то же время, недостатком является отсутствие намерений создания интегральных систем индикаторов для решения этих проблем.

Следует подчеркнуть, что первой «ласточкой» создание индикаторов контроля производственных процессов стало появление научных работ Абрамовой [15]. Создание индикаторов определения экологических процессов в окружающей среде уже рассматривается с учетом промышленных техногенных воздействий при изучении вопросов проектов ОВОС (оценка воздействия на окружающую среду). В работах разработана методология индексной оценки проектов ОВОС их характеристикой формирования экологических опасностей в окружающей среде, как последствий производственной деятельности. В связи с этим, нами выбран, в качестве аналога (прототипа) применение индексов проектируемой производственной деятельности [15] при проведении научных работ по ОВОС. Эти работе рассматриваются, как ближайшие аналоги-ориентиры, относительно разработки и применения количественных индикаторов безопасности или опасности производственных технологических процессов. Но, индикаторы-регистраторы для энергетически теплотехнических систем теплоснабжения, в наше время по данным доступной научно-технической литературы, еще не разработаны, хотя связанные с использованием природных и энергоресурсов [1].

При таких условиях возникла необходимость разработки интегральных систем контроля безреагентной обработки воды в электромагнитных полях в системах теплоснабжения одной из современных нанотехнологий получения омагниченной воды в них. Необходимость контроля за новым технологическим процессом в системах теплоснабжения усугубляется также фактом отключения электроэнергии на территориальном (местном) уровне (в течение трехлетних исследований их фиксировалось до 3% в год) и определения технологического регламента по омагничиванию технической воды в системах теплоснабжения.

Учитывая анализ и систематизацию данных научно-технической литературы и результаты собственных исследований, предложен двухуровневый индикаторный контроль за процессами омагничивания воды в системах теплоснабжения. Интегральные системы индикаторного контроля связаны с созданием критериев удельных показателей определенных параметров безреагентной обработки воды в электромагнитных полях (табл.). То есть, направленность первого индикаторного уровня контроля, связанная с определением стабильности градаций, которые связаны с параметрами технологического процесса обработки воды.

Несмотря на то, что стабильность технологии омагничивания воды не вызывает сомнений и подтверждена трехлетней эксплуатацией пилотной установки и ее неоднократными производственными испытаниями [1] одновременно кратковременные отключения электроэнергии могут повлиять на процесс омагничивания воды. Именно, второй уровень индикаторного контроля позволяет спрогнозировать возникновение опасных техногенных рисков и подтвердить отсутствие изменений механизма аддитивной функции в процессе подготовки технической воды.

Таким образом, установлено: 1) двухуровневый индикаторный контроль за процессами омагничивания воды в системах теплоснабжения: рассматривается механизм аддитивной функции процесса омагничивания воды, как математической производных удельных показателей, и их коррелирующих коэффициентов во взаимосвязях с аддитивными свойствами системы теплоснабжения, которая является обусловленной величиной от удельных показателей и их коэффициентов; 2) намерения технологического контроля за структурно-составляющими материальных потоков в системе теплоснабжения и аддитивные функции этой системы имеют свои особенности контроля, сказывается на формулировке интегральных систем индикаторного контроля; 3) установлено, по результатам наших исследований, и с учетом иерархической системы характеристики их – индикатор упорядоченности материальных потоков в системе теплоснабжения =  $\leq 1$ .

Таблица. – Характеристика уровней градации научно-методологического контроля за процессом омагничивания воды в электромагнитных полях с помощью контрольных интегральных систем-индикаторов

Удельные показатели	Двухуровневая система индикаторов процесса омагничивания воды					Уровень экологической безопасности		
	Первый уровень контроля			Второй уровень контроля				
	max доп.	min доп.	opt. уровень	формир. техног. рисков	Адит. функц. безреаг. воды	max допуст. уров.	min допуст. уров.	opt. уров.
Частота колебаний эл.-магн. полей	0,8	0,01	0,45	0,54 – для оптим. градац.	0,22 – для оптим. градац.	условно-безопасный	небезопасный	безопасный
Величина индукции эл.-магн. поля	0,96	0,05	0,56			условно-безопасный	небезопасный	безопасный

Интегральные удельные показатели (индикаторы) контроля за результатами безреагентной обработки воды в электромагнитных полях при определении динамики изменений технологии подготовки технической воды в системах теплоснабжения будут рассмотрены в последующих публикациях (индикатор возможности формирования техногенных рисков – в пределах 1,01%; индикатор – показатель механизма аддитивной функции в системе теплоснабжения – в пределах 5,01 у.е. Благодаря системному подходу применения двухуровневого (по своим структурно-функциональной направленности организации контроля) интегрального индикаторного контроля создаются всесторонние условия, которые в дальнейшем позволят принимать определенные управленческие решения для надежной технологической реализации способа безреагентной обработки воды в электромагнитных полях, способствовать разработке методических основ для эколого-техногенного управления производством.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Журавська, Н.Є. Енергоресурсоощадні системи теплопостачання шляхом обробки води в електромагнітних полях : дис. канд. .. техн. наук / Н.Є.Журавська. – Київ : КНУБА, 2015. – 163 с.
2. Баран, Б.А. Влияние магнитного поля на мицеллообразование и коагуляцию сульфата бария в водных растворах / Б.А. Баран // ЖФХ. – 1999. – Т. 73. – № 11. – С. 2089–2090.
3. Система обробки води в електромагнітних полях : пат. на корисну модель №100236 / Е.С. Малкін, І.Е. Фуртат, Н.Є. Журавська, Н.О. Коваленко ; дата публ. 10.07.2015.
4. Система приготування омагніченої в електромагнітних полях води та розчинів і сполук на її основі : пат. на корисну модель №102494 / Е.С. Малкін, І.Е. Фуртат, Н.Є. Журавська ; дата публ. 26.10.2015.
5. Устройство магнитной обработки воды УМОВ РОС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ross.com.ua/catalog/other/umov.php>.
6. Магнитная обработка воды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.genon.by/>.

7. Магнитное поле активатора и свойства воды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.magnetik.com.ua/interesnye-fakty-o-energetix.html>.
8. Магнитная обработка в теплоэнергетических установках [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [inmegamag.ua/magnit\\_neodimovu\\_lechebni.html](http://inmegamag.ua/magnit_neodimovu_lechebni.html).
9. Білявський, Г.О. Основи екології (теорія та практика) / Г.О. Білявський, А.І. Бутченко, В.М. Навроцький. – Київ : Лібра, 2002. – 352 с.
10. Yreen Yrowth Indicators 2014 [Электронный ресурс] // ОЕСД. – 2014. – Режим доступа: <http://www.oecd.org/env/green-growth-indicators-2013-976926420-en.htm>.
11. Рудько, Г.И. Землеология. Эколого-ресурсная безопасность Земли / Г.И. Рудько. – Київ : Академпрес, 2009. – 512 с.
12. Шитиков, В.К. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В.К. Шитиков. – Тольятти : ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
13. Измалков, В.И. Техногенная и экологическая безопасность и управление риском / В.И. Измалков, А.В. Измалков. – СПб. : НИЦЭБ РАН, 1998. – 482 с.
14. Статюха, Г.О. До питання визначення ризиків впливу енергетичних забруднень при ОВНС // Г.О. Статюха, Т.В. Бойко, А.О. Абрамова // Східно-Европ. журнал передових технологій. – 2010. – № 2/10(44). – С. 4–10.
15. До питання кількісної оцінки екологічної безпеки при ОВНС / Г.О. Статюха [та інш.] // Східно-Европ. журнал передових технологій. – 2010. – № 6/6(48). – С. 44–46.



## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫМИ ВОЗДУХОВОДАМИ

Т.И. Королёва, С.В. Ланкович, П.Е. Ковалевский, С.А. Яковенко

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: kafedratgsv@mail.ru

*Рассмотрены способы воздухораспределения в помещениях различными воздухо-распределителями, представлены исследования с помощью компьютерного моделирования и опытных испытаний воздухораспределения текстильными воздуховодами при различных температурных режимах.*

*Ключевые слова: воздухораспределение, текстильный воздуховод, воздушная струя, перфорация, воздухообмен.*

## RESEARCH OF METHODS OF AIR DISTRIBUTION WITH TEXTILE DUCTS

T. Koroleva, S. Lankovich, P. Kovalevski, S. Yakovenko

Polotsk State University, Belarus

email: kafedratgsv@mail.ru

*The article deals with the methods of air distribution in rooms by different air tions, presents research using computer modeling and experimental tests of air distribution by textile ducts at different temperature regimes.*

*Keywords: air distribution; textile ducts; air stream; perforation, air change.*

Системы воздухораспределения предназначены для подачи и распределения воздуха с заданными скоростью и направлением движения его в рабочей или обслуживаемой зоне помещений, а также для отвода его из помещений.

Применяют канальные и бесканальные системы воздухораспределения.

*Канальные системы* (системы с рассредоточенной подачей воздуха) осуществляют подачу приточного воздуха с помощью каналов, оборудованных распределительными устройствами (соплами, решетками и насадками различной конструкции, перфорированными панелями и др.) [1].

В *бесканальных системах* воздухораспределения отсутствуют распределительные каналы, а приточный воздух подается в помещение распределительными устройствами, установленными в приточных патрубках охлаждающих или нагревающих аппаратов (системы с сосредоточенной подачей воздуха).

Подача приточного воздуха в канальных и бесканальных системах воздухораспределения осуществляется в виде струй.

Струи приточного воздуха состоят из двух участков: начального и основного. В подавляющем большинстве случаев рабочим является основной участок приточных струй.

Начальный участок приточных струй характеризуется тем, что осевая скорость струи равна начальной (на выходе из воздухораспределителя).

Длина начального участка приточных струй  $x_{нач}$ , м, определяется по формулам [2]: для компактных и веерных струй

$$x_{нач} = m\sqrt{f_0}; \quad (1.1)$$

для плоских струй

$$x_{нач} = m^2 b_0, \quad (1.2)$$

где  $m$  – аэродинамический коэффициент воздухораспределителя (конструктивная характеристика);  $f_0$  – площадь живого сечения для выхода приточной струи,  $m^2$ ;  $b_0$  – ширина (высота) отверстия для выхода приточной струи из воздухораспределителя, м.

Для перфорированных воздухораспределительных устройств (перфорированные воздуховоды, панели и др.) за ширину  $b_0$  принимают ширину перфорированного участка (например, ширина перфорированного воздуховода).

Основной участок приточных струй характеризуется тем, что осевая скорость постепенно уменьшается по мере увеличения расстояния  $x$  от воздухораспределителя до рассматриваемого сечения.

Форма струи зависит от формы воздухораспределителя.

*Компактные струи* образуются при истечении воздуха из отверстий круглой формы или формы, близкой к квадратной (при истечении из цилиндрических и конических патрубков и сопел, душирующих патрубков различной конструкции, приточных регулирующих решеток, щелевых решеток при отношении длины к ширине менее 5) [2].

*Плоские струи* образуются при истечении из отверстий вытянутой прямоугольной и щелевидной формы (при истечении из плоских сопел, решеток с параллельными направляющими лопатками, щелевидных насадков с параллельными направляющими лопатками, перфорированных воздухораспределителей и др.).

*Веерные и конические струи* образуются при истечении воздуха из воздухораспределителей, выполненных в виде дисковых и других потолочных плафонов.

Компактные и плоские приточные струи характеризуются тем, что векторы скорости при истечении воздуха из воздухораспределителя параллельны между собой, а веерные и конические – тем, что векторы скорости при истечении воздуха из приточных отверстий образуют между собой некоторый угол.

Воздух подается в помещения, как правило, приточными струями, имеющими температуру, отличающуюся от температуры воздуха помещений. Следовательно, приточные струи в основном неизотермические. Развитие таких струй происходит под влиянием инерционных и гравитационных сил, возникающих вследствие разности плотности воздуха в струе и помещении и выражаемых критерием Архимеда  $Ar$ . Траектория струи и параметры воздуха в ней зависят от соотношения названных сил. Влияние этих сил учитывается коэффициентом неизотермичности  $K_n$ , который входит в формулы для расчета скорости приточного воздуха.

Приточные струи считают *свободными*, если их движение не нарушается влиянием ограничивающих плоскостей и других струй [2]. Струи считают *стесненными*, если они испытывают тормозящее действие обратного потока. В действующих системах имеют место только стесненные струи, так как они ограничены в движении строительными конструкциями, оборудованием, трубопроводами и т. д.

Выбор способов подачи приточного воздуха зависит от высоты и назначения помещений, высоты и вариантов размещения оборудования, а также от требований, предъявляемых к равномерности распределения параметров воздуха. Рациональными способами подачи приточного воздуха могут быть способы, обеспечивающие вертикальную подачу через перфорированные панели, каналы, сопловые насадки и потолочные плафоны, а также способы горизонтальной подачи выше рабочей зоны. При выборе способов подачи воздуха одновременно определяют способ удаления нагретых и увлажненных потоков воздуха из помещений. Удаление таких потоков воздуха может осуществляться из верхней или нижней зоны, а также из рабочей зоны помещений. Способ удаления воздуха из помещений и варианты

размещения вытяжных устройств и распределительных каналов выбирают с учетом технологических, комфортных, санитарно-гигиенических условий и требований охраны труда для обслуживающего персонала, находящегося на постоянных рабочих местах.

Выбирая способы подачи и удаления воздуха, одновременно предварительно выбирают приточные и вытяжные воздухораспределительные устройства, их число и варианты размещения относительно друг друга. Совместным выбором способов подачи и удаления воздуха практически обусловлен выбор способа воздухораспределения в данном помещении.

Способ распределения воздуха в помещении в системах с текстильными воздуховодами отличается от стандартных систем тем что, такие системы с тканевыми воздуховодами не имеют диффузоров или решеток, монтируемых в воздуховод. Текстильный воздуховод уже с момента производства одновременно является воздухораспределителем.

Текстильные воздуховоды имеют ряд преимуществ перед традиционными системами распределения воздуха, в состав которых входят стальные воздуховоды и обычные воздухо-распределительные устройства, в том числе позволяют добиться равномерного распределения воздуха с требуемой скоростью [3].

Текстильные воздуховоды имеют круглую, прямоугольную, полукруглую, треугольную формы поперечных сечений, а также форму квадранта, сегмента или сектора, могут изготавливаться из воздухопроницаемой или из воздухонепроницаемой ткани.

В текстильных воздуховодах для раздачи воздуха используются микроперфорация, перфорация, малые и большие сопла.

Микроперфорация представляет собой отверстия величиной 0,2–0,4 мм, которые делаются в воздуховоде еще на предприятии-изготовителе на лазерном станке. С помощью программного обеспечения заранее рассчитывается расстояние между отверстиями микроперфорации в одном ряду, а также расстояние между рядами микроперфорации таким образом, чтобы обеспечить требуемые расход воздуха и скорость воздушного потока для обеспечения нормируемых параметров микроклимата помещения. Кроме того, программа расчетов компании-производителя PRIHODA SW позволяет выбрать необходимую поверхность распределения.

Перфорация представляет собой отверстия с диаметром от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. В большинстве случаев, диаметр используемой перфорации составляет 4–12 мм. Перфорация может быть сделана как по всей длине воздухораспределителя, так и прерывистыми участками. С помощью программного обеспечения PRIHODA SW можно задать направление распределения воздушного потока через перфорацию, откорректировать количество рядов и диаметр перфорации.

Малые сопла могут иметь диаметр 20, 30 либо 40 мм. Они могут быть выполнены в «промышленном» или «премиум» исполнении. Сопло в «промышленном» исполнении изготавливается из одного слоя ткани с обычным обрезанным краем. Сопло в «премиум» исполнении имеет 2 слоя ткани и хорошо обработанную кромку.

Большие сопла позволяют добиться максимальной дальности воздушной струи. Диаметр больших сопел составляет порядка 80–100 мм. Существует 3 разновидности больших сопел: фиксируемое сопло, регулируемое сопло и направленное сопло. Регулируемое сопло имеет вшитую кулису, с помощью которой можно на месте монтажа отрегулировать скорость выхода воздуха. Направленные сопла позволяют изменить направление распределения воздушного потока через сопла непосредственно на месте монтажа, в уже смонтированном воздуховоде. Направление регулируемого сопла может меняться в диапазоне  $\pm 45^\circ$ .

Все вышеуказанные способы раздачи воздуха могут иметь различные комбинации между собой.

При моделировании воздушных потоков выбраны пять наиболее распространенных способов воздухораспределения текстильными воздуховодами при трех температурных режимах:

- 1)  $t_n = t_e$  (изотермический процесс в помещении);
- 2)  $t_n < t_e$  (процесс кондиционирования или охлаждения воздуха в помещении).
- 3)  $t_n > t_e$  (процесс воздушного отопления помещения).

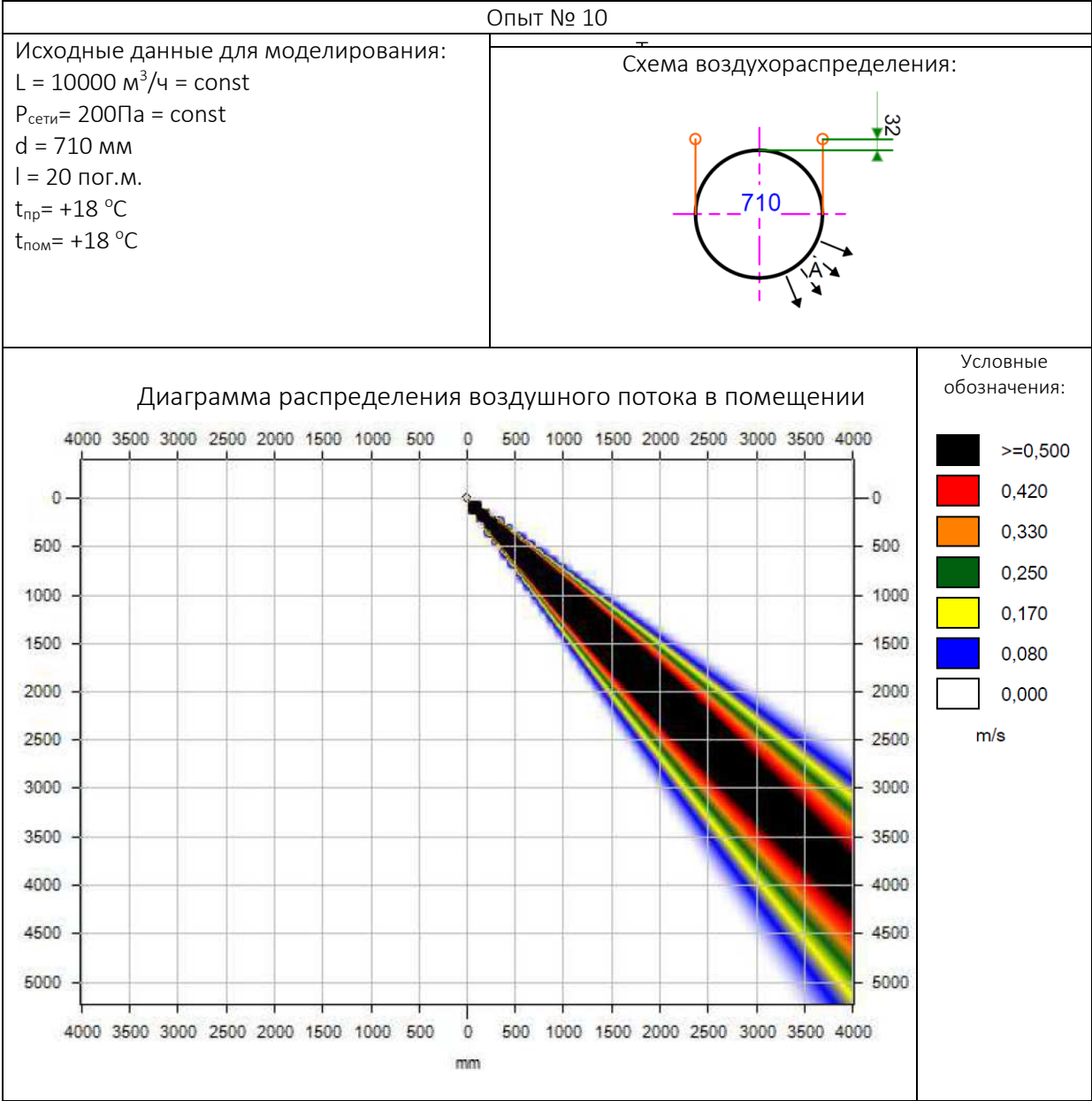
где  $t_n$  – температура приточного воздуха, °C,  $t_e$  – нормируемая температура внутреннего воздуха, °C.

Совмещая один из пяти способ воздухораспределения с каждым температурным режимом, получаем 15 различных опытных моделей воздушных потоков.

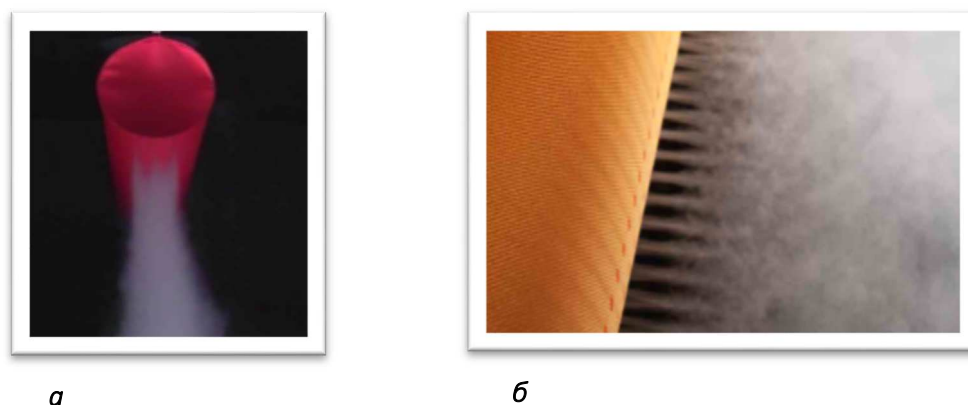
Расчет текстильных воздухораспределителей, а также моделирование воздушных потоков были произведены с помощью программы PRIHODA SW – программного софта чешской компании-производителя текстильных воздуховодов, предназначенного для проектирования текстильных систем распределения воздуха. Все произведенные в программе расчеты можно выводить в pdf-формате.

Результаты компьютерного моделирования для каждого опыта сведены в таблицу с указанием исходных данных для моделирования воздушных потоков, типа, схемы и диаграммы воздухораспределения (пример для опыта 10 представлен в таблице)

Таблица. – Результаты компьютерного моделирования



Полученную диаграмму воздушного потока подтверждают испытания в задымляемой экспериментальной камере (рисунок 1а и 1б).



**Рисунок 1. – Испытания в задымляемой камере:**  
**а** – вертикальная подача воздуха; **б** – горизонтальная подача воздух

Перфорация применяется в тех случаях, когда воздуховод достаточно удален по высоте от рабочей зоны (3-8 метров). Этот способ воздухораспределения позволяет раздавать воздух в помещении, достигая нормируемых значений скорости воздушного потока в рабочей зоне и обеспечивая требуемый воздухообмен в помещении. Количество рядов перфорации, а также угол распределения воздушного потока, подбирается в каждом случае индивидуально. Кроме того, ряды перфорации могут быть выполнены как равномерно по всей длине текстильного воздухораспределителя, так и отдельными участками.

Этот способ воздухораспределения получил самое широкое применение в производственных цехах предприятий пищевой, химической и текстильной промышленности, в невысоких складах, помещениях спортивных сооружений, офисах, супермаркетах, ресторанах, кинотеатрах и других помещениях.

Данный тип воздухораспределения текстильными воздуховодами уже используется в производственном цехе шоколадной фабрики ООО «Вителла» в г. Витебске, торговом зале гипермаркета «Евроопт» в г. Новополоцке, цехе розлива ОАО «Лидский молочно-консервный комбинат» в г. Лиде.

Аналогичные исследования были произведены для 15 вышеуказанных вариантов моделей воздушных потоков, что позволило выработать общие рекомендации по применению каждого способа воздухораспределения при заданном воздушном режиме и предложить их использовать с учётом назначения помещения и технологического процесса в нем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гримитлин, М.И. Распределение воздуха в помещениях. / М.И. Гримитлин. –СПб. : АВОК Северо-Запад, 2004. – 320с.
2. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. / под ред. Н.Н. Павлова, Ю.И. Шиллера. – Ч. 3. Кн. 2 : Вентиляция и кондиционирование воздуха (Справочник проектировщика). – 4-е изд., перераб. – М. : Стройиздат, 1992. – 319 с.
3. Королёва, Т.И. Оптимизация воздухораспределения с использованием текстильных воздуховодов / Т.И. Королёва, С.В. Ланкович, В.А. Пшеничнюк // Материалы докладов 50-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной году науки, Витебск, 20 апр. 2017 г. / Витеб. гос. технол. ун-т ; редкол. А.А. Кузнецов [и др.]. – Витебск, 2017. – Т. 1. – С. 278–281.

УДК 697: 721.011.025 (075.8)

ОСНОВЫ ТЕОРИИ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОВОЗДУХООБМЕНА  
ЧЕРЕЗ ВЕНТИЛИРУЕМЫЕ ОКОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ  
ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОЗАЩИТЫ И ГЕРМЕТИЧНОСТИ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

В.И. Липко, Е.С. Добросольцева, А.С. Лапезо  
Полоцкий государственный университет, Беларусь  
email: kafedratgsv@mail.ru

*Рассмотрены конструктивно-технологические решения оконных стеклопакетов в энергоэффективных зданиях повышенной теплозащиты и герметичности, широко применяемые в практике градостроительства. Представлены результаты исследований аэродинамических процессов, происходящих в вентилируемых оконных конструкциях. На основании проведенного анализа подтверждаются multifunctional возможности применения вентилируемых оконных конструкций для помещений зданий с наружными ограждениями повышенной теплозащиты и герметичности. Представлен расчет количества воздухопронусных каналов с учетом нормативного воздухообмена и в зависимости от диаметров каналов и аэродинамического сопротивления на проход воздуха.*

*Ключевые слова: тепловоздухоснабжение; энергоресурсосбережение; комфортные условия.*

FUNDAMENTALS OF THE THEORY OF AERODYNAMICS AND HEAT AND AIREXCHANGE THROUGH  
VENTILATED WINDOW DESIGN OF ENERGY  
EFFICIENT BUILDINGS INCREASED THERMAL INSULATION AND  
AIR-TIGHTNESS

V. Lipko, E. Dobrosoltseva, A. Lapezo  
Polotsk state University, Belarus  
email: kafedratgsv@mail.ru

*The article considers structural and technological solutions of window glass in buildings increased thermal protection and air tightness, widely used in the practice of urban planning. The results of theoretical and analytical studies of the aerodynamic processes in the ventilated window designs are presented. On the basis of the analysis confirmed the possibility of the multifunctional use of ventilated window designs for buildings with external enclosures with advanced thermal protection and integrity. A calculation of the number of air pass channels considering the standard air change and depending on the diameters of the channels and the aerodynamic resistance to the passage of air.*

*Keywords: heat and air supply; energy and resource saving; comfortable environment.*

Для зданий повышенной теплозащиты и герметичности наружных ограждающих конструкций вентилируемые окна найдут достойное применение в жилищнокоммунальной сфере градостроительной практики благодаря широким функциональным возможностям, таким как:

- прямым функциям освещения помещений дневным светом;
- дополнительным функциям воздухозаборного устройства наружного приточного вентиляционного воздуха с эффектом саморегулирования расхода нормативного воздухообмена вентилируемых помещений;
- дополнительным функциям приемника теплоты прямой и рассеянной солнечной радиации в дневное время суток за счет «парникового» эффекта;
- дополнительным функциям обеспечения стабильного комфортного проживания в условиях активной естественной вентиляции, приобретающей особую значимость для герметичных зданий с повышенными теплозащитными характеристиками наружных ограждающих конструкций;
- дополнительным функциям энергосбережения за счет минимизации энергопотребления от внешних источников и широкого применения вторичных и природных энергоресурсов.

Для снижения теплопотерь при переходе на энергоэффективное строительство зданий за последние десятилетия широко стали применять такие строительные материалы, как бетон, железобетон, стекло, металл, пластмассы, мастики, клеи, герметики, теплоизоляцию, гидроизоляцию, пароизоляцию, которые практически воздухонепроницаемы, но особенно эффект герметизации наружных ограждений стал заметным при широком использовании оконных конструкций из металла и пластика по европейским стандартам, при которых естественная вентиляция зданий перестала работать из-за полного отсутствия инфильтрации приточного воздуха и в жилых помещениях зданий стала появляться избыточная влажность и загазованность, при которых условия воздушной среды не соответствуют комфортным для проживания, но создавались условия для развития плесени и грибковых образований, разрушающих отделочные материалы, обои, деревянные конструкции, а избыточная влага снижала теплозащитные характеристики наружных ограждений зданий.

Негативные последствия герметизации наружных ограждающих конструкций зданий были исследованы и изложены в работах [1, 2]. Одним из вариантов решения разгерметизации наружных ограждений зданий является создание запатентованных вентилируемых оконных блоков [3], которые получили дальнейшее развитие в работах [4,5,6-8].

Использование каналов малых диаметров  $d_k=1,4\div 10,0$  мм для вентиляции помещений герметичных зданий в практике градостроительства было впервые предложено в работах [1,2], а их научная новизна подтверждена патентами на изобретения [9,10,11].

Особенностью каналов оконного блока малых диаметров является возможность саморегулирования расхода приточного вентиляционного воздуха без специальных средств автоматики за счет зависимости аэродинамического сопротивления от скорости воздушного потока. При движении воздуха по каналам в ламинарном режиме малое аэродинамическое сопротивление обеспечивает нормируемый расход воздуха, но дальнейшее увеличение скорости воздуха в канале, например, за счет ветрового давления, приводит к резкому параболическому увеличению аэродинамического сопротивления и скорость воздушного потока в канале стабилизируется.

При строительстве домов используется множество разновидностей стекла и изделий из него. Листовое строительное стекло широко используется в домостроении для остекления оконных и дверных проемов, балконов и лоджий, навесных светопрозрачных фасадных систем. Стекольная промышленность освоила также выпуск стеклопакетов, профильного стекла, пустотелых стеклблоков, армированного, матового, цветного, узорчатого, рифленного и других видов стекла со специальными низкоэмиссионными или селективными защитными покрытиями. Современные технологии позволяют изготавливать стеклопакеты с вакуумированием межстекольного пространства или заполнением инертными газами.

Выше описанные конструктивные решения и технологические схемы по повышению сопротивления теплопередаче световых проемов требуют значительных финансовых затрат, которые не всегда оправдываются сэкономленной при этом тепловой энергией. Как показывает анализ, применение инертных газов, многослойных коробок и переплетов со сложным конструктивно- технологическим исполнением не всегда экономически и экологически целесообразно, а различные покрытия стекла значительно снижают их светопрозрачность и срок эксплуатации.

Необходимость дальнейшего конструктивно-технологического усовершенствования заполнений световых проемов зданий возникла после изменения нормативной базы Республики Беларусь по сопротивлению теплопередаче окон до значения  $R \geq 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ . В Полоцком государственном университете запатентован приточный вентиляционный оконный блок [3], основным назначением которого является освещение дневным светом помещений в сочетании с функциями воздухозаборного устройства наружного приточного вентиляционного воздуха с эффектом саморегулирования расхода нормативного воздухообмена вентилируемых помещений; дополнительными функциями рекуперативного теплообменника с утилизацией трансмиссионной теплоты для предварительного подогрева наружного приточного вентиляционного воздуха круглосуточно; дополнительными функциями теплоприемника природной теплоты прямой и рассеянной солнечной радиации в дневное время суток за счет «парникового» эффекта; дополнительными функциями шумоглушения при ориентации фасада зданий на шумные транспортные магистрали; дополнительным функциям обеспечения комфортного проживания в условиях активной естественной вентиляции, приобретающей особую значимость для герметичных зданий с повышенными теплозащитными характеристиками наружных ограждающих конструкций; дополнительным функциям энергосбережения за счет минимизации энергопотребления от внешних источников и широкого использования возобновляемых вторичных и природных энергоресурсов.

Приточный вентиляционный оконный блок (рисунок 1) представляет собой раму, изготовленную из дерева, пластмассы, металла и в которой герметично закреплены три светопрозрачные перегородки из стекла, оргстекла и т.п. В раме имеются три выступающие стеклодержателя со сквозными отверстиями малых диаметров, расположенные в определенном порядке: во внешнем 1 – снизу, в промежуточном 2 – сверху и во внутреннем стеклодержателе 3 – снизу. Работает приточный вентиляционный оконный блок следующим образом.

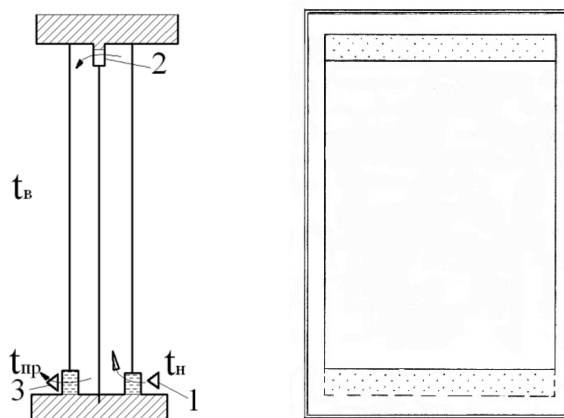


Рисунок 1. – Приточный вентиляционный оконный блок



Из-за перепада давлений внутри и снаружи помещений, связанного с работой вытяжных систем вентиляции по принципу инфильтрации, холодный наружный приточный вентиляционный воздух в расчетно- нормативных количествах входит через наружные отверстия внешнего стеклодержателя 1 в наружное межстекольное пространство и поднимаясь вверх через отверстия промежуточного стеклодержателя 2 поступает во внутреннее межстекольное пространство, опускается вниз и сквозь отверстия внутреннего стеклодержателя 3 поступает в вентилируемое помещение.

При движении внутри вентилируемого приточного оконного блока холодный наружный приточный воздух воспринимает и аккумулирует трансмиссионную теплоту, теряемую помещением через внутреннюю поверхность остекления круглосуточно в отопительный период, а с наружной поверхности остекления ежедневно воспринимает и аккумулирует природную энергию прямой и рассеянной солнечной радиации для дополнительного подогрева приточного вентиляционного воздуха, поступающего в помещение в нормируемых количествах за счет регулируемого количества каналов и их диаметра, определяемых специальным расчетом, суть которого состоит в следующем.

В многоэтажных зданиях системы вытяжной вентиляции создается гравитационное давление  $P_g$ , пропорциональное высоте канала  $h$  и разности плотностей наружного и внутреннего воздуха  $\rho_n, \rho_g$ , определяемого по формуле

$$P_g = 0,9 \cdot h \cdot g \cdot (\rho_n - \rho_g), \quad (1)$$

где 0,9 – коэффициент запаса на неучтенные потери;

$h$  – высота канала, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_n, \rho_g$  – плотность наружного и внутреннего воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Часть гравитационного давления  $P_g$  затрачивается на преодоление аэродинамического сопротивления самого канала, определяемого как сумма потерь давления на трение и местные сопротивления по формуле (2) и аэродинамического сопротивления  $S_{вх}$  на вход воздуха через отверстия малых диаметров, расположенные в стеклодержателях приточного оконного блока, определяемого как остаточное давление по формуле (3), которое зависит от этажности помещений.

Аэродинамическое сопротивление канала  $P_c$ , Па,

$$P_c = \Sigma(R \cdot l \cdot \beta + Z) \quad (2)$$

где  $P_{тр} = R \cdot l \cdot \beta$  – потери давления на трение, Па/м;

$R$  – сопротивление трению 1м воздуховода, канала, Па/м [12];

$l$  – длина канала, м;

$\beta$  – поправочный коэффициент, зависящий от шероховатости каналов, воздуховодов [12];

$Z = \Sigma \xi \cdot (\rho_g \cdot V_k^2 / 2)$  – потери давления в местных сопротивлениях, Па;

$\Sigma \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений в зависимости от вида местного сопротивления на участке [12];

$V_k$  – скорость движения воздуха в канале, м/с.

Аэродинамическое сопротивление на вход воздуха через отверстия малых диаметров  $S_{\text{вх}}$ , определяется как остаточное давление по формуле

$$S_{\text{вх}} = \Delta P_9 = P_z - P_c. \quad (3)$$

На рисунке 2 представлены графически экспериментально определенные зависимости суммарного аэродинамического сопротивления  $S_{\text{вх}} = \Delta P_9$  от скорости в отверстиях различных диаметров  $dk=3 \div 9$  мм, из которых по величине остаточного давления  $\Delta P_9$  можно определить скорость  $V_k$  в отверстиях (каналах) разных диаметров  $dk$ , а затем и расход воздуха  $L_k$  через единичный канал. Количество отверстий  $n_k$  определяется по нормативному воздухообмену, равному тройной площади пола помещения, деленного на пропускную способность единичного отверстия  $L_k$ , по формуле

$$n_k = L_g^H / L_k, \text{шт.}, \quad (4)$$

где  $L_g^H$  – нормативный воздухообмен, м<sup>3</sup>/ч, принимаемый с учетом воздушного баланса в помещении;

$L_k = 3600 \cdot V_k \cdot F = 3600 \cdot V_k \cdot (\pi \cdot d_k^2 / 4)$  – расход воздуха в отверстии, м<sup>3</sup>/ч.

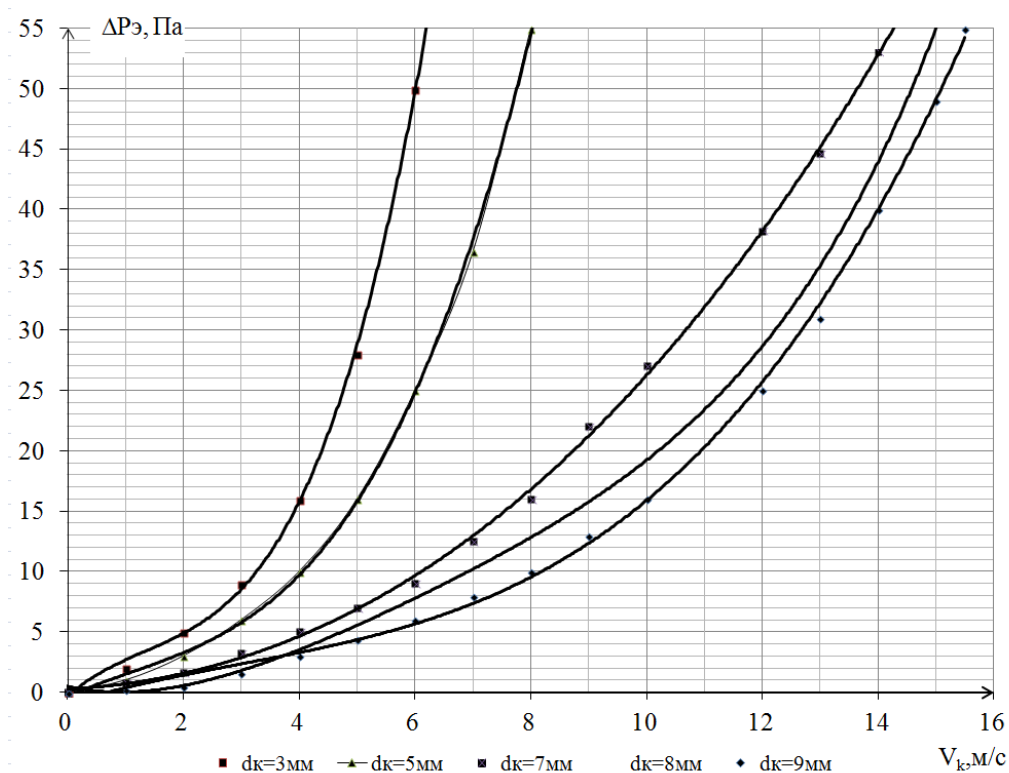


Рисунок 2. – Зависимости аэродинамического сопротивления на проход воздуха для разных диаметров отверстий

На основе классической теории аэродинамики рассмотрим для примера аэродинамический расчет процессов естественной вентиляции 9-ти этажного жилого здания, расположенной в Минске с жилой площадью  $F_n=16\text{ м}^2$  с совмещенным туалетом и ванной комнатой. Согласно действующей нормативной базе [13] объемный расход приточного воздуха

равен  $L_{np} = 3 \cdot F_n = 3 \cdot 16 = 48 \text{ м}^3 / \text{ч}$ , а объемный расход вытяжного воздуха равен  $L_{\text{выт}} = L_m + L_e = 25 + 25 = 50 \text{ м}^3 / \text{ч}$ . В соответствии с воздушным балансом принимаем воздухообмен в помещении равным  $50 \text{ м}^3 / \text{ч}$ .

Для естественной вентиляции в вытяжном канале задаемся скоростью  $V_k < 1 \text{ м/с}$  и из выражения для определения расхода воздуха в канале с учетом скорости  $V_k = 0,5 \text{ м/с}$  определим диаметр вытяжного канала

$$d_k = \sqrt{4 \cdot L / (3600 \cdot \pi \cdot V_k)} = \sqrt{4 \cdot 50 / (3600 \cdot 3,14 \cdot 0,5)} = 0,18 \text{ м}.$$

Для вытяжного канала из помещения первого этажа аэродинамическое сопротивление  $P_c$  определено по формуле (2):

$$P_c = 0,035 \cdot 30 \cdot 1,148 + (2 + 1) \cdot (1,2 \cdot 0,5^2 / 2) = 1,74 \text{ Па}.$$

Естественное гравитационное давление, определенное по формуле (1) составило

$$P_g = 0,9 \cdot 30 \cdot 9,8 \cdot (1,4 - 1,2) = 52,9 \text{ Па}.$$

Для входных отверстий через приточный оконный блок ограничим скорость движения воздуха ламинарным режимом при критериальном коэффициенте Рейнольдса  $Re \leq 2000$ . Для диаметра отверстий  $d_k = 0,009 \text{ м}$ , зная остаточное давление, определенное по формуле (3),

$$S_{\text{ex}} = \Delta P_g = 52,9 - 1,74 = 51,2 \text{ Па},$$

по графику (рис. 2) определили скорость движения воздуха в приточном отверстии оконного вентиляционного блока  $V_k = 15,2 \text{ м/с}$ . Пропускная способность по воздуху единичного отверстия составила

$$L_k = 3600 \cdot 15,2 \cdot (3,14 \cdot 0,009^2 / 4) = 3,47 \text{ м}^3 / \text{ч},$$

а для обеспечения нормативного воздухообмена требуется число отверстий, определенное по формуле (4)

$$n_k = 50 / 3,47 = 14,4,$$

принимаем 15 шт.

Аналогичные расчеты выполнены для окон, расположенных на других этажах, а результаты расчетов представлены в таблице.

Если величина остаточного давления  $\Delta P_g$  стремится к нулевому значению или при повышении температуры наружного воздуха в формуле (1) при определении гравитационного давления разность плотностей наружного и внутреннего воздуха приближается к нулевым значениям, то необходимо включение параллельно установленной механической вытяжной вентиляции, а в неотапительный период естественное проветривание помещений осуществляется через форточки или индивидуальные канальные вентиляторы, что предусмотрено действующей нормативной базой.

Таблица. – Количество отверстий в приточном оконном блоке в зависимости от остаточного давления на различных этажах жилого дома

Номер этажа	Высота канала $h$ , м.	Потери давления на трение $P_{тр}$ , Па/м	Потери давления в местных сопротивлениях $Z$ , Па	Аэродинамическое сопротивление канала $P_c$ , Па	Гравитационное давление $P_g$ , Па	$0,9 \cdot P_g$	Остаточное давление $\Delta P_o$ , Па	Скорость воздуха в приточном оконном отверстии $V_k$ , м/с	Расход воздуха в единичном отверстии $L_k$ , м³/ч	Число отверстий $n$ , шт.
1	30	1,2	0,54	1,74	58,8	52,9	51,2	15,2	3,47	15
2	27	1,08	0,54	1,62	52,9	47,6	46,0	14,7	3,36	15
3	24	0,96	0,54	1,5	47,04	42,3	40,8	14,1	3,2	16
4	21	0,84	0,54	1,38	41,16	37,0	35,6	13,4	3,1	16
5	18	0,72	0,54	1,26	35,28	31,8	30,5	12,9	2,94	17
6	15	0,6	0,54	1,14	29,4	26,5	25,3	12,0	2,74	18
7	12	0,48	0,54	1,02	23,52	21,2	20,2	10,9	2,49	20
8	9	0,36	0,54	0,9	17,64	15,9	15,0	9,7	2,22	23
9	6	0,24	0,54	0,78	11,76	10,6	9,8	8,0	1,83	27

*Примечание:* Данные таблицы представлены при температуре наружного воздуха минус 24°C, воздухообмене в помещении  $L = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ ., для вытяжного канала диаметром  $d_k = 0,18 \text{ м}$ ., выполненного из бетона, скорости воздуха в этом канале  $V_k = 0,55 \text{ м/с}$  и диаметре входного отверстия в оконном блоке  $d_k = 9 \text{ мм}$ .

Результаты аналитических и теоретических исследований аэродинамических процессов в вентилируемых оконных конструкциях зданий повышенной теплозащиты и герметичности наружных ограждений подтверждают многофункциональные возможности применения вентилируемых окон, как для освещения помещений дневным светом, так и для выполнения дополнительных функций:

- воздухозаборного устройства наружного приточного вентиляционного воздуха с эффектом саморегулирования расхода нормативного воздухообмена жилых помещений без дополнительных средств автоматики;
- рекуперативного теплообменника с утилизацией трансмиссионной теплоты для предварительного подогрева наружного приточного вентиляционного воздуха;
- теплоприемника природной теплоты прямой и рассеянной солнечной радиации за счет «парникового» эффекта;
- обеспечения стабильного комфортного проживания в условиях активной естественной вентиляции, приобретающей особую значимость для зданий с повышенными характеристиками теплозащиты и герметичности наружных ограждающих конструкций;
- энергосбережения за счет минимизации теплопотребления от внешних энергоисточников и широкого применения возобновляемых вторичных и природных энергоресурсов, которые подтверждаются исследованиями в работах [14, 15].

# ЛИТЕРАТУРА

1. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий. В 2 т. / В.И. Липко. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – Т. 1. – 300 с.
2. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий. В 2 т. / В.И. Липко. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – Т. 2. – 246 с.
3. Приточный вентиляционный оконный блок : пат. BY947 / В.И. Липко ; дата публ.: 30.09.2003.
4. Липко, В.И. Энергоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий. В 2 т. / В.И. Липко. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – Т. 1. – 212 с.
5. Липко, В.И. Энергоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий. В 2 т. / В.И. Липко. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – Т. 2. – 392 с.
6. Липко, В.И. Утилизация трансмиссионной теплоты при инфильтрации приточного воздуха через вентилируемые оконные стеклопакеты / В.И. Липко, Е.С. Добросольцева, Е.К. Синюкович // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. Инженерные сети, экология и энергоресурсосбережение. – 2015. – № 16. – С. 103–108.
7. Липко, В.И. Построение физических и математических моделей к вопросу теории расчёта рекуперативного теплообмена при инфильтрации приточного воздуха через энергосберегающие вентилируемые двухслойные стеклопакеты с утилизацией трансмиссионной теплоты./ В.И. Липко, Е.С. Добросольцева, С.В. Ланкович // Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально- экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах : материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., 9-10 апр. 2013 г., Брянск : в 2 т. – Т. 2. – Брянск, 2013. – С. 75–81.
8. Lipko, V. Dobrosoltseva E., Sinukovich E. System of heat and air supply of hermetic buildings / V. Lipko // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сб. научн. тр. по материалам междунар. заоч. науч.-практ. конф. –2015. – № 7, ч. 1 (18-1) (Volume 3, issue 7, part 1). – С. 20–23.
9. Вентиляционное приточное устройство : пат. BY4410 / В.И. Липко, В.А. Борвонов ; дата публ.: 30.03.2002.
10. Рекуперативный приточный вентиляционный элемент : пат. BY4651 / В.И. Липко, В.А. Борвонов ; дата публ.: 30.09.2002.
11. Воздухоприточное устройство : пат. BY4963 / В.И. Липко. ; дата публ.: 30.03.2003.
12. Внутренние санитарно- технические устройства. В 2 ч. / под ред. И.Г. Старовойтова. – Изд. 3-е. – Ч. 2. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – М. : Стройиздат, 1978. – 509 с.
13. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха = Ацяпленне, вентыляцыя і кандыцыяніраванне паветра : СНБ 4.02.01-03. – Введ. 30.12.2003 (с отменой на территории РБ СНиП 2.04.05-91). – Минск : Минскстройархитектура, 2004. – 78 с.
14. Юрков, О. Эффективный способ сокращения теплопотерь через окна многоэтажных жилых зданий / О. Юрков // Архитектура и строительство. – 2010. – №1. – С. 88–89.
15. Данилевский, Л.Н. Теплофизические характеристики окон из комбинированного материала дерево–полиуретан–дерево / Л.Н. Данилевский, Б.И. Таурогинский // Строительная наука и техника. – 2006. – № 5. – С. 8–15.

АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ  
И КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ В НАУКУ И ПРАКТИКУ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА

В.И. Липко, О.Н. Широкова, А.С. Лепезо  
Полоцкий государственный университет, Беларусь  
email: kafedratgsv@mail.ru

*Необходимость в преобразовании энергозатратной технологии и отопительно-вентиляционной техники в сфере жилищного строительства тесно связана с реструктуризацией инженерных систем со значительно меньшими затратами материальных средств и энергоресурсов за счёт более широкого использования вторичных и природных энергоисточников. Представлены основные направления научных исследований по экономии энергетических и сырьевых ресурсов в одном из наиболее энергозатратных секторов экономики – градостроительном, где энергоёмкость единицы национального продукта Республики Беларусь значительно превышает индустриально развитые страны мира.*

*Ключевые слова: энергосбережение, теплоснабжение, отопление, вентиляция, реструктуризация, модернизация, утилизация.*

ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL IMPROVEMENT OF ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS IN THE SCIENCE AND PRACTICE OF URBAN PLANNING

V. Lipko, V. Shyrokava, A. Lapezo  
Polotsk State University, Belarus  
email: kafedratgsv@mail.ru

*The need in transformation of energy-consumption technology and of heating and ventilation mechanism in the system of house building is closely connected to the restructuring of engineering systems at a much lower costs of material and energy resources to the increased use of secondary and natural resources. The article describes the main directions of scientific research on saving energy resources and ran materials in one of the most energy-consumption sectors of the economy-urban engineering, where energy intensity of the national product in the Republic of Belarus is must higher than in industrialized countries.*

*Keywords: energy saving, heat supply, heating, ventilation, restructuring, modernization, recycling.*

Использование природных ресурсов в значительной степени зависит от уровня достижений науки, техники и передового опыта в области создания энергоресурсоэффективных конструктивно-технологических решений, направленных на снижение энергоресурсоёмкости единицы национального дохода. Отопительно-вентиляционная техника, теплотехническое оборудование из всех энергопотребляющих отраслей экономики занимают одно из первых мест, потребляя ежегодно свыше трети всех видов топливно-энергетических ресурсов, что является тяжелым бременем для всей экономики Республики Беларусь, не имеющей своей топливно-энергетической базы в полном объеме и расположенной в географической зоне с умеренно-холодным климатом.

Эксплуатация объектов жилищно-коммунального хозяйства связана с необходимостью обогрева зданий одновременно с непрерывной подачей свежего наружного воздуха в помещения с постоянным или длительным пребыванием людей для удовлетворения требований комфортного проживания или технологических процессов, например, сжигания топлива.

В общественные здания наружный воздух поступает в вентилируемые помещения неорганизованно сквозь толщу наружных ограждений за счет воздухопроницания и через неплотности оконных и дверных притворов под действием вытяжной вентиляции за счет инфильтрации. В многоэтажных зданиях конструктивно-планировочные решения с наличием внутри зданий лестнично-лифтовых объемов создают вынужденные условия аэрации, при которых нижняя часть объема здания находится под разрежением и работает в режиме инфильтрации, а верхняя часть объема здания из-за теплового гравитационного подпора работает в режиме эксфильтрации. Неорганизованная фильтрация холодного наружного воздуха способствует интенсивному сквозному продуванию здания: горизонтальному под действием ветрового напора и вертикальному за счет сил гравитации, что значительно переохлаждает здание и неизбежно приводит к безвозвратным потерям тепловой энергии и дискомфорту микроклимата жилых помещений.

Для нормализации микроклимата и энергоресурсосбережения при строительстве и эксплуатации жилых зданий на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Полоцкого государственного университета разработаны и запатентованы [1-3] рекуперативные воздухоприточные устройства для новой высокоэффективной безинфильтрационной технологии вентиляции зданий любой этажности, конфигурации, объема и конструктивного исполнения с наружными ограждениями повышенной теплозащиты и герметичности, обеспечивающей нормируемый режим воздухообмена каждого вентилируемого помещения без специальных средств автоматики, комфортные условия проживания и энергоресурсосбережение.

В целях снижения материальных средств и энергоресурсов на тепловоздухоснабжение жилых чердачных зданий разработано несколько энергоресурсоэффективных конструктивно-технологических решений с использованием модернизированных технологических чердаков, навесных вентилируемых светопрозрачных фасадных систем и многоступенчатой утилизацией вторичных и природных энергоресурсов по патентам [4–11].

Модернизация технологического чердака, превращенного из объемной вытяжной секционной камеры в приточную вентиляционную камеру, обеспечивает утилизацию трансмиссионной теплоты, теряемой зданием через потолок верхнего этажа круглосуточно на протяжении всего отопительного периода, а также используется теплота прямой и рассеянной солнечной радиации в дневное время отопительного периода дополнительно для нагрева наружного приточного вентиляционного воздуха, поступающего через объем технологического чердака, что суммарно позволяет экономить до 36 % теплопотребления зданием от внешних теплоисточников за счет вторичных и природных энергоресурсов.

На уменьшение отопительной нагрузки здания в дневное время суток существенное влияние оказывает прямая и рассеянная солнечная радиация, которая воздействует на вертикальные ограждающие конструкции, закрытые навесными светопрозрачными вентилируемыми фасадными системами, и существенно поднимает температуру циркулирующего в щелевом канале наружного воздуха за счёт так называемого «парникового эффекта», суть которого заключается в следующем. Лучистая энергия видимой части солнечного спектра с длиной волн в диапазоне от 380 до 1500 нм легко проникает сквозь кристаллическую решётку обычного силикатного стекла и нагревает наружную поверхность наружного огражде-

ния, от которой отражается тепловой поток, но уже в виде инфракрасного излучения с длиной волны от 7,5 до 14 нм, для которых оконное стекло становится экраном, а вся отражённая тепловая энергия аккумулируется наружным воздухом, циркулирующим внутри щелевого канала, поднимая его температуру на значительную величину.

Для обеспечения устойчивой тяги в вытяжных каналах в некоторых конструкциях предлагаемых к внедрению отопительно-вентиляционных устройств, работающих при естественной гравитационной циркуляции воздушных потоков, предусматривается установка в устье вытяжной шахты дефлекторов, дополнительно усиливающих естественную гравитационную составляющую тяги за счёт природной энергии ветра.

При малоэтажном строительстве жилых домов коттеджного типа в агрогородках, небольших населённых пунктах, спальных пригородных районах, численность которых постоянно возрастает, используют для автономного отопления индивидуальные котлы, так как из-за большого разброса абонентов по территории застройки централизованное теплоснабжение не всегда экономически обосновано.

Для энергоресурсоэффективного тепловоздухоснабжения малоэтажных зданий на кафедре разработано и запатентовано устройство приточной вентиляции здания, совмещённой с его обогревом [12]. Предлагаемая к внедрению авторская разработка основана на вторичном использовании теплоты бытовых теплопоступлений, трансмиссионной теплоты, теряемой зданием через наружные ограждающие конструкции, теплоты выбрасываемых высокотемпературных газов от отопительного котла, теплоты удаляемого вытяжного воздуха, а также природной теплоты солнечной радиации и энергии ветра.

За участие в Республиканской выставке и семинаре «Новые строительные технологии и материалы», проводимой под эгидой Минстройархитектуры Республики Беларусь, Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь и Белорусским институтом системного анализа информационного обеспечения научно-технической сферы эта работа отмечена Дипломом за лучшую инновационную разработку.

В жилищном строительстве и при эксплуатации зданий повышенной теплозащиты и герметичности ограждающих конструкций основную долю затрат на тепловоздухоснабжение составляют теплопотери через окна. При коэффициенте остекления в среднем для жилых зданий  $k=0,35$  и нормативе по теплозащите  $R \geq 1 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$  суммарные безвозвратные теплопотери через оконные конструкции зданий превышают трансмиссионные потери теплоты для других типов ограждений. В связи с актуальностью данной проблемы на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Полоцкого государственного университета проведены научные исследования по инновационной модернизации конструктивного исполнения оконных стеклопакетов с наделением им функций рекуперативного пластинчатого теплообменника с аэродинамическим режимом управляемой инфильтрации наружного приточного воздуха, утилизацией трансмиссионной теплоты, теряемой через поверхность остекления, и использованием природной теплоты прямой и рассеянной солнечной радиации для подогрева приточного вентиляционного воздуха. Новизна научной разработки подтверждена патентом № 947и Республики Беларусь, по результатам которого выполнено построение физической и математической моделей, разработаны основы теории аэродинамических и тепломассообменных процессов, произведён сравнительный анализ различных вариантов конструктивного исполнения вентилируемых оконных стеклопакетов, по которым рекомендованы оптимальные технические решения по их использованию. Благодаря санитарно-гигиеническим, теплотехническим, конструктивно-технологическим, экологическим и социально-



экономическим преимуществам вентилируемый оконный стеклопакет конструкции Полоцкого государственного университета предлагается для широкого использования в практике градостроительства [13].

По результатам участия в выполнении важнейшей тематики Республики Беларусь: ГНТП № 1.5.159 «Разработать и внедрить энергосберегающие материалы и технологии в строительстве и эксплуатации зданий и сооружений» по разделу «Модернизация и тепловая санация существующего жилого фонда» отдельным пунктом выполнялась тема по заданию Минстройархитектуры №2.02.04 «Разработать безинфильтрационную технологию вентиляции жилых зданий с наружными ограждениями повышенной герметичности». Полоцким государственным университетом подготовлена и издана 2-х томная монография «Вентиляция герметизированных зданий», которая была затребована многими научными, проектными, строительными и эксплуатирующими организациями Республики Беларусь и Российской Федерации [14].

По важнейшей Государственной научно-технической программе ГНТП 4.02.08 «Создать и внедрить новые материалы, энергосберегающие технологии и ресурсоэкономные конструктивные системы жилых домов, снижающие ресурсо- и энергопотребление при строительстве и эксплуатации жилья» Полоцкий государственный университет также принимал участие в разделе «Строительные материалы и технологии» по заданию Минстройархитектуры № 1.1.455 «Создать и внедрить эффективную беструбную систему отопления жилых зданий, снижающую ресурсо- и энергопотребление при ее строительстве и эксплуатации», по результатам которой подготовлена и издана двухтомная монография «Энергоресурсоэффективное тепловоздушоснабжение гражданских зданий», которая также активно востребована субъектами хозяйствования. Результаты выполненных исследований по важнейшей тематике доложены на Научно-техническом Совете Минстройархитектуры и положительно оценены [15].

В целях выполнения стратегического партнёрства в сфере энергосбережения и возобновляемых источников энергии между органами государственного управления, субъектами хозяйствования и учреждениями, занимающимися научной деятельностью, рекомендовать проектным, строительным и эксплуатирующим организациям более детально ознакомиться с научными разработками Полоцкого государственного университета по тематике энергоэффективного жилья и использования вторичных и природных энергоисточников, т.к. по данному направлению исследований только по кафедре теплогазоснабжения и вентиляции опубликовано 15 патентов, три двухтомных монографии и свыше 200 научных статей, т.е. создана достаточно обширная информативная база, что даёт основание предположить о более активном привлечении к использованию научных разработок кафедры в практику градостроительства.

На основании вышеизложенного по результатам выполненных патентных исследований, аналитических, натурных и экспериментальных изысканий и инженерных расчётов можно сделать следующие выводы [16-23]:

- в целях повышения энергоэффективности архитектурно-планировочных решений вновь возводимые здания для максимального природного их обогрева целесообразно ориентировать коротким торцевым фасадом на север, на который также вынести лестнично-лифтовый объем без его отопления, что даёт снижение энергопотребления от внешних энергоисточников до 20%.
- в целях нормализации микроклимата при естественной вентиляции зданий и повышения энергоэффективности целесообразно использовать рекуперативные воздухоприточные устройства с автоматизированным регулируемым режимом воздухообмена;

— предлагаемые к внедрению инновационно модернизированные технологические схемы жилых зданий повышенной теплозащиты и герметичности ограждающих конструкций с использованием навесных светопрозрачных вентилируемых фасадных систем, реконструированных технологических чердаков, функционирующих как объёмные приточные секционные вентиляционные камеры с установкой в них рекуперативных теплоутилизаторов обеспечивают снижение теплопотребления от внешних энергоисточников свыше 73,5% за счёт трёхступенчатой схемы рекуперации трансмиссионной теплоты, теряемой зданием через вертикальные и потолочные ограждающие конструкции, а также рекуперации теплоты вытяжного вентиляционного воздуха, при этом экономия материальных средств за отопительный период только для односекционного десятиэтажного жилого дома серии 90 составляет свыше 50 мл. бел. рублей по данным Совета Министров РБ стоимости тепловой энергии на конец 2014 года;

— для энергоресурсоэффективного тепловоздухоснабжения малоэтажных зданий с индивидуальными отопительными котлами целесообразно использовать теплоту топочных газов от котлов для воздушного обогрева зданий, совмещённого с активной вентиляцией, обеспечивающих комфортное проживание с минимальным потреблением топливно-энергетических ресурсов;

— для зданий с наружными ограждениями повышенной теплозащиты и герметичности из всех рассмотренных многочисленных технологических и конструктивных решений наилучшие технологические, аэродинамические, социально-экономические и санитарно-экологические характеристики имеют вентилируемые оконные стеклопакеты и стеклоблоки. Наличие жалюзи в них улучшают теплотехнические показатели, но значительно увеличивают аэродинамические сопротивления на инфильтрацию наружного воздуха через межстекольное пространство, что в условиях естественной вентиляции жилых зданий становится не приемлемым, а механическая вентиляция для жилых зданий не всегда экономически обоснована.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вентиляционное приточное устройство : пат. № 4410А / В.И. Липко, В.А. Борванов ; дата публ.: 30.03.2002.
2. Рекуперативный приточный вентиляционный элемент : пат. № 4651А / В.И. Липко, В.А. Борванов ; дата публ.: 30.09.2002.
3. Воздухоприточные устройства : пат. № 4963А / В.И. Липко ; дата публ.: 30.03.2003.
4. Отопительно-вентиляционная система здания : пат. 1134u / В.И. Липко ; дата публ.: 30.12.2003.
5. Устройство приточной вентиляции здания : пат. 892u / В.И. Липко, А.Н. Бенд ; дата публ.: 30.06.2003.
6. Оголовок вытяжного вентиляционного блок а: пат. 5954А / В.И. Липко, В.А. Барвонов ; дата публ.: 30.03.2004.
7. Отопительно-вентиляционная система здания : пат. 9599u / В.И. Липко, В.А. Зафатаев, С.В. Липко ; дата публ.: 30.10.2013.
8. Рекуперативное устройство приточно-вытяжной вентиляции здания : пат. 8381u / В.И. Липко, С.В. Липко ; дата публ.: 30.06.2012.
9. Устройство приточно-вытяжной вентиляции здания : пат. 7952u / В.И. Липко, С.В. Липко ; дата публ.: 28.02.2012.
10. Технологический чердак здания : пат. 9618u / В.И. Липко, Е.С. Добросольцева, С.В. Липко, С.В. Ланкович ; дата публ.: 30.10.2013.
11. Устройство приточно-вытяжной вентиляции здания : заявка u20130985 / В.И. Липко, О.Н. Широкова ; дата публ.: 24.02.2014.

12. Устройство приточной вентиляции здания, совмещенной с его обогревом : пат. 8998u / В.И. Липко, С.В. Липко, Е.А. Самохвал. О.Н. Широкова ; дата публ.: 28.02.2013.
13. Приточный вентиляционный оконный блок : пат. 947u / В.И. Липко ; дата публ.: 30.09.2003.
14. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2 т. / В.И. Липко. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000.
15. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий : в 2 т. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2004.
16. Липко, В.И. Инновационная модернизация систем тепловоздухоснабжения чердачных зданий по критерию энергосбережения / В.И. Липко, С.В. Ланкович // Вестник БрГТУ. – 2015. – № 2. – С. 52–55.
17. Липко, В.И. Инновационная модернизация отопительно-вентиляционных устройств для малоэтажных индивидуально отапливаемых зданий / В.И. Липко. О.Н. Широкова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1, №4. – С. 9–21.
18. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение чердачных зданий / В.И. Липко, А.С. Лапезо, С.В. Ланкович // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1, №4. – С. 84–90.
19. Липко, В.И. Теория исследования работы рекуперативных приточных вентиляционных элементов в инновационной технологии поддержания микроклимата герметизированных зданий / В.И. Липко. Н.В. Кундро // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1. №4. – С. 230–238.
20. Липко, В.И. Утилизация трансмиссионной теплоты при инфильтрации приточного воздуха через вентилируемые оконные стеклопакеты / В.И. Липко, Е.С. Добросольцева. Е.К. Синюкович // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – С. 103–108.
21. Липко, В.И. Инновационная модернизация отопительно-вентиляционных устройств эжекторного типа для малоэтажных зданий / В.И. Липко, О.Н. Широкова. А.С. Лапезо // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Сиб. гос. автомобильно-дорожная акад. – Омск : СибАДИ, 2015. – С. 337–341.
22. **Василевич, Н.А.** Резервы снижения материальных затрат и энергоресурсов в системах тепловоздухоснабжения зданий повышенной теплозащиты и герметичности ограждений / Н.А. Василевич, В.И. Липко, О.Н. Широкова // Материалы докладов 48 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной 50-летию университета. В 2 т. / ВГТУ. – Витебск, 2015. – С. 68–70.
23. Липко, В.И. Энергоресурсосберегающие новационные технологии тепло-, газо-, воздухоснабжения жилых зданий и использование возобновляемых вторичных и природных энергоресурсов в градостроительстве / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2016. – С. 89–95.

**ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ  
ПО СНИЖЕНИЮ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАБОТАЮЩИХ В ГОРЯЧИХ ЦЕХАХ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТОДАМИ ЭКРАННО-ШТОРНОЙ АЭРАЦИИ**

*В.И. Липко, О.Н. Широкова, А.С. Ланезо*

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: kafedratgsv@mail.ru

*Рассмотрены производственные процессы в литейных цехах, сопровождающиеся выделением в воздух помещений вредных паров, газов, пыли и тепла, которые влияют на самочувствие работающих в результате ухудшения состояния воздушной среды помещений. Основными путями борьбы с выделением вредных веществ являются: совершенствование технологических процессов, создание безотходных производств или малоотходных технологических циклов. Разработана технологическая схема экранно-шторной аэрации, ограничивающая тепловые горизонтальные воздействия на работающих в рабочей зоне и методика проведения исследований по определению эффективности действия с возможностью визуальной и инструментальной фиксации аэродинамических и теплотехнических параметров.*

*Ключевые слова: местная и общеобменная вентиляция, аэрация, естественная и вынужденная конвекция, моделирование, источник теплоты.*

**INNOVATIVE SOLUTIONS FOR ENERGY SAVING  
TO REDUCE HEAT IMPACTS ON WORKERS IN HOT PLANTS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES BY  
METHODS OF SCREEN-CURTAIN AERATION**

*V. Lipko, V. Shyrokava, A. Lapezo*

Polotsk State University, Belarus

email: kafedratgsv@mail.ru

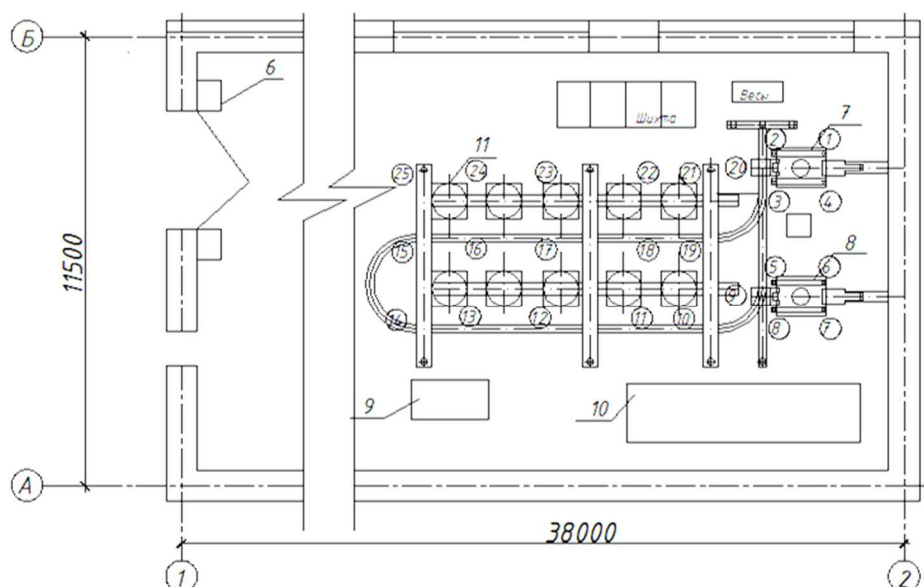
*Examined production processes in foundries shopfloor, accompanied by the release into the indoor air of harmful vapours, gases, dust and heat, which can affect the health working in the degradation of the air environment of premises. The main ways of combating emissions are: improvement of technological processes, the creation of non-waste or low-waste production technology cycles. Design the technological scheme of the screen-curtain aeration limiting horizontal thermal impact on the working in the working area and methods of research to determine the effectiveness of actions with the possibility of visual and instrumental fixation of the aerodynamic and thermal parameters.*

*Keywords: local and general ventilation, aeration, natural and forced convection, model analysis, heat source.*

Литейное производство характеризуется значительными выделениями в атмосферу помещений вредных веществ (пыли, газов, избыточной влаги и теплоты), что оказывает отрицательное воздействие на здоровье работающих, а также на оборудование и строительные конструкции. Несмотря на совершенствование технологии производства, герметизацию

газо- и пылевыведяющего оборудования, теплоизоляцию и экранирование источников теплоты, часть выделяющихся вредных веществ проникает в производственные помещения.

На участке установки индукционных печей и мест розлива металла в кокели завода ОАО «Технолит» были выполнены замеры параметров микроклимата (рис. 1).



**Рисунок 1. – Участок установки индукционных печей  
и мест розлива металла в кокели завода ОАО «Технолит»**

Для измерения температуры и относительной влажности воздушной среды на рассматриваемых участках был использован термогигрометр Testo 605. Погрешность измерения относительной влажности которого составляет  $\pm 3\%$ , а температуры  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . С учетом рекомендаций В.А. Минко, число замеров определялось их продолжительностью в пределах 2-2,5 часа [1].

Результаты обследований микроклимата цеха показали, что нередко температура воздуха на рабочих местах превышает нормируемую на  $10\text{--}15^\circ\text{C}$ . В этих условиях важнейшими средствами создания в рабочих зонах условий, соответствующих санитарно-гигиеническим нормам, является широкое применение местной вытяжной вентиляции и организация общего воздухообмена помещений. Общеобменная вентиляция литейных цехов организуется совместно с достаточно мощной местной вытяжной вентиляцией. Их рациональное сочетание позволяет поддерживать необходимый состав воздушной среды цеха при меньших расходах вентиляционного воздуха. Кроме того, общеобменная вентиляция литейных цехов применяется для регулирования их теплового режима – ассимиляции и отвода избытков теплоты в летний период и воздушного отопления в холодный период года.

Основными путями борьбы с выделением вредных веществ являются: совершенствование технологических процессов, создание безотходных производств или малоотходных технологических циклов. Для поддержания в производственных помещениях чистоты воздуха и метеорологических условий, удовлетворяющих санитарно-гигиеническим требованиям, устраивается вентиляция. В общем случае процесс аэрации, как один из способов естественной вентиляции производственных помещений с теплоизбытками, зависит от условий внешней аэродинамики здания и теплового режима внутри помещений. Для обеспечения активного воздухообмена при аэрации используется ветровой напор и разность

температур наружного и внутреннего воздуха. Следуем принять к сведению, что метод аэрации для удаления из помещений избытков теплоты будет эффективным только при низких температурах наружного воздуха, а при сближении температур наружного и внутреннего воздуха действие аэрации сводится к нулю, что требует устройства принудительной вентиляции, работающей дополнительно по параллельной схеме.

Наиболее часто применяемые в вентиляционной практике приемы расчета аэрации методами «нейтральной зоны» и «уровня нулевых давлений» в большинстве случаев оказываются неточными из-за неравномерности температур внутри помещений по причине изменяющихся параметров внешних воздействий (ветрового давления, направления ветра, температуры наружного воздуха, разрегулировки площади приточных и вытяжных отверстий, инфильтрации и т.д.) [2-3].

Естественный перепад давлений определяется по формуле

$$\Delta P = h \cdot g \cdot (\rho - \rho_o) = h \cdot g \cdot \rho \cdot \beta \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где  $h$  – расстояние по вертикали между приточными и вытяжными отверстиями, м;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho, \rho_o$  – плотность наружного и внутреннего воздуха соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{273}$  – температурный коэффициент, °C<sup>-1</sup>.

$\Delta T$  – разность температур внутреннего и наружного воздуха, °C.

При моделировании аэрации применимо следующее критериальное уравнение

$$Eu = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot \omega^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления в потоке, Па,

$\frac{\rho \cdot \omega^2}{2}$  – кинетическая энергия потока, Па.

После преобразования получим критериальное уравнение Архимеда

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot \omega^2} = \frac{h \cdot g \cdot \rho}{\rho \cdot \omega^2} \cdot \beta \cdot \Delta T = Ar.$$

Таким образом, критерий Архимеда является определяющим при рассмотрении процессов аэрации зданий, так как в его составе величины, входящих в условие однозначности.

Аэрацию следует рассматривать как процесс естественной конвекции, состоящую из двух групп явлений: внешняя и внутренняя естественная конвекция. Под внешней конвекцией подразумевается явление теплоотдачи от нагретой поверхности теплоисточника в окружающую среду, а под внутренней конвекцией следует рассматривать явление теплоотдачи в замкнутом воздушном пространстве через ограничивающие стенки (например, экранно-шторного укрытия) с фиксацией полей температур и скоростей аэродинамики воздушных восходящих конвективных потоков [4].

При больших сосредоточенных восходящих потоках над точечными источниками за счет естественной конвекции математическое моделирование осуществляется с использованием равенства

$$Re^2 = Gr / Ar, \quad (3)$$

где  $Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu}$  – критерий Рейнольдса;

$Gr = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T$  – число Грасгофа;

$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{273 + t_o}$  – температурный коэффициент,  $^{\circ}C^{-1}$ .

$L$  – определяющий характерный линейный размер поверхности теплообмена, м;

$\Delta T = (t_c - t_o)$  – соответственно разность температур поверхности теплообмена и окружающей среды,  $^{\circ}C$

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $m^2 / c$ .

$Ar = 1$  – критерий Архимеда.

Соотношение (3) подтверждает то обстоятельство, что единственным результатом работы подъемной силы является кинетическая энергия восходящего воздушного потока, величина скорости которого определяется по уравнению

$$\frac{\rho \cdot \omega^2}{2} = g \cdot \rho \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Z, \quad (4)$$

из которого следует, что

$$\omega = \sqrt{2g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Z}.$$

Тогда значение критерия  $Re$  примет вид

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu} = \sqrt{Gr \cdot \frac{Z}{d}}, \quad (5)$$

где  $Z$  – расстояние по высоте от источника, м;

$d$  – диаметр восходящего потока, м.

Удаление вентиляционного воздуха при аэрации здания осуществляется через специальные аэрационные фонари с вытяжными отверстиями, расположенными выше крыши, или вытяжные шахты. Для количественного регулирования расхода вентиляционного воздуха в приточных и вытяжных отверстиях устанавливаются регулируемые решётки.

При естественной циркуляции воздушных потоков внутри помещений горячих цехов с интенсивными тепlopоступлениями образуется несколько зон с различными температурами.

Динамические процессы в горячих цехах тесно связаны с тепломассообменом. Суммарные тепловыделения от нагретых поверхностей печей, остывающего и расплавленного металла осуществляются за счёт конвекции и лучеиспускания [5–7].

Для снижения вредного воздействия на работающих высоких температур от нагретых поверхностей активных источников тепlopоступлений предлагается в горячих цехах применять технологическую схему управляемой экранно-шторной аэрации, ограничивающая зону высоких температур от рабочей зоны помещений так, как это показано на рисунке 2.

Переносные экраны 1, выполненные из листовых материалов, хорошо отражающих лучистую энергию от расплавленного металла или нагретых поверхностей оборудования горячих цехов, например, алюминиевой фольги с жестким каркасом из профильного металла,

создадут экранированную защиту рабочей зоны. Шторы 2 из термостойкого материала, например, из стеклоткани, спускающиеся сверху от конструкции аэрационного фонаря или вытяжной шахты, установленной на крыше, позволяют максимально изолировать рабочую зону от активного воздействия проникающей тепловой радиации от горячих источников, от которых вверх поднимаются конвективные потоки перегретого воздуха.

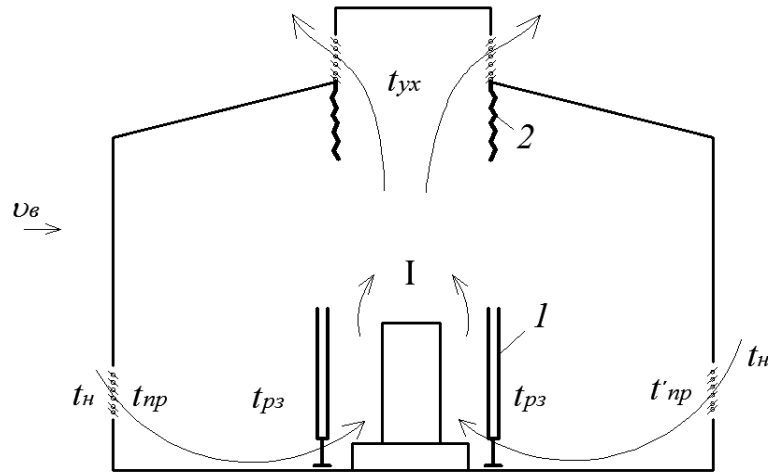


Рисунок 2. – Схема управляемой экранно-шторной аэрации, ограничивающей тепловые горизонтальные воздействия в рабочей зоне с возможностью перемещения избыточной теплоты восходящими вертикальными конвективными потоками I, формирующими циркуляцию внутри здания

Технические решения для борьбы с тепловой радиацией от источника теплоты горячих цехов отличаются от всех известных аналогичных устройств простотой конструктивного исполнения, экономичностью в изготовлении, малой массивностью, мобильностью в эксплуатации, так как их конструкции могут перемещаться по цеху в пространстве по площади и по высоте и при необходимости устанавливаться в любом месте или демонтироваться на некоторое время. Высота экранов 1, а также глубина свесов штор 2 может регулироваться при необходимости для достижения максимального эффекта локализацию тепловых воздушных потоков и вывода избыточной теплоты из рабочей зоны горячих производственных помещений.

Параметры микроклимата в рабочей зоне фиксировались психрометром и термопреобразователями сопротивления ТС-Б типа Pt 100, подключенными к устройству для измерения и контроля температуры УКТ38-Щ4-ТС.

Система сбора и обработки информации реализовалась в виде двухуровневого программно-аппаратного комплекса. При этом на нижнем уровне сбора информации использовались термопреобразователи сопротивления, объединенные через контролер с помощью последовательного интерфейса RS-232 с компьютером. Программно-аппаратный комплекс верхнего уровня состоит из компьютера и программы. Передача данных на верхний уровень производилась непосредственно по магистралям RS-232. Для наблюдения и архивирования данных использовался пакет программ Owen Process Manager 1.X с отображением результатов.

Обработка данных выполненных экспериментов по оценке эффективности действия экранно-шторной аэрации определится на основании критериальных зависимостей теории подобия аэродинамических и тепломассообменных процессов с целью оптимизации режимных параметров эксплуатации [8–9].



Тепловое воздействие на работающих от нагретых поверхностей происходит как за счет лучеиспускания, так и конвекции, что вызывает дискомфорт в рабочей зоне. Предлагаемые технические решения для борьбы с тепловой радиацией от источника теплоты литейных цехов, с целью защиты работающих, отличаются от всех известных аналогичных устройств простотой конструктивного исполнения, экономичностью в изготовлении, малой массивностью, мобильностью в эксплуатации, так как их конструкции могут перемещаться по цеху в пространстве по площади и по высоте и при необходимости устанавливаться в любом месте или демонтироваться на некоторое время.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Минко, В.А. Обеспыливание в литейных цехах машиностроительных предприятий / В.А. Минко, М.И. Кулешов, Л.В. Плотникова и др. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.
2. Рысин, С.А. Вентиляционные установки машиностроительных заводов : справ. / С.А. Рысин. – М. : Машиздат, 1964. – 704 с.
3. Внутренние санитарно-технические устройства. В 2 ч. / под ред. И.Г. Староверова. – М. : Стройиздат, 1978. – 510 с.
4. Королёва, Т.И. Управление конвективными потоками для удаления вредностей от источников теплогазовыделений / Т.И. Королёва, О.Н. Широкова // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2010. – № 1(18). – С. 119–124.
5. Королёва, Т.И. Моделирование свободных конвективных потоков от линейных источников теплоты/ Т.И. Королёва, О.Н. Широкова // Новое в технике и технологии в текстильной и легкой промышленности : материалы докладов Междунар. науч.-техн. конф. / Витеб. гос. технол. ун-т. – Витебск, 2015. – С. 277–278.
6. Липко, В.И. Методические разработки к расчету управляемой аэрации цехов с теплоизбытками для нормализации микроклимата / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Материалы докладов 49 Международной научно-практической конференции преподавателей и студентов. В 2 т. / Витеб. гос. технол. ун-т. – Витебск, 2016. – С. 315–317.
7. Липко, В.И. Основы теории аэростатики, аэродинамики, тепломассообменных процессов и методики расчета аэрации цехов с теплоизбытками / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. / БрГТУ. – Брест, 2016. – С. 290–297.
8. Липко, В.И. Экспериментальный стенд и методика исследования эффективности действия экранно-шторной аэрации от теплового воздействия точечного теплоисточника / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Материалы докладов 50 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной Году науки. В 2 т. / Витеб. гос. технол. ун-т. – Витебск, 2017. – С. 322–324.
9. Липко, В.И. Моделирование аэрации производственных цехов с точечными источниками тепловыделений / В.И. Липко, О.Н. Широкова // Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности : материалы докладов Междунар. науч.-техн. конф., посвященной Году науки / Витеб. гос. технол. ун-т. – Витебск, 2017. – С. 223–226.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ  
С МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ПРИРОДНЫХ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

В.И. Липко, О.Н. Широкова, А.С. Ланезо  
Полоцкий государственный университет, Беларусь  
email: kafedratgsv@mail.ru

*Для решения вопросов энерго- и ресурсосбережения в практике градостроительства предлагается применение вентиляции с многоступенчатой технологией рекуперации возобновляемых энергоресурсов. Методика позволяет аналитически инженерными методами расчета определить снижение теплотребления от внешних энергоисточников на цели отопления зданий повышенной теплозащиты и герметичности наружных ограждающих конструкций с использованием навесных вентилируемых светопрозрачных фасадов и технологических чердаков.*

*Ключевые слова: энергосбережение, теплоснабжение, отопление, вентиляция, реструктуризация, модернизация, утилизация.*

METHODS OF CALCULATION AND DESIGN OF ENERGY EFFICIENT BUILDINGS WITH MULTI-USE  
TECHNOLOGY NATURAL AND RENEWABLE ENERGY

V. LIPKO, V. SHYROKAVA, A. LAPEZO  
Polotsk State University, Belarus  
email: kafedratgsv@mail.ru

*In order to solve the issues of energy and resource saving in the practice of urban planning, it is proposed to use ventilation with multi - stage technology of renewable energy resources recovery. The method allows the analytical engineering methods of calculation to determine the reduction in heat from external energy sources for space heating in buildings increased thermal insulation and tightness of the outer shielding structures using ventilated glass facades and technological attics.*

*Keywords: energy saving, heat supply, heating, ventilation, restructuring, modernization, recycling.*

В настоящее время в практике градостроительства проектируют жилые здания повышенной этажности с «тёплыми» чердаками. В 1986 году началось массовое строительство типовых серий жилых зданий с «тёплыми» чердаками во всех республиках СНГ, включая и Республику Беларусь, где заводы крупнопанельного домостроения изготавливают, а строители возводят и сдают в эксплуатацию жилые дома с «тёплыми» чердаками. В процессе эксплуатации зданий с «тёплыми» чердаками возникают серьёзные проблемы, связанные с невыполнением нормативных воздухообменов, «опрокидыванием» циркуляции, перетеканием удаляемого вытяжного воздуха по каналам вышерасположенных квартир, отсутствием эжекции воздуха из каналов-спутников в верхних этажах, открывающихся в объём «тёплого» чердака. Неудовлетворительная работа вытяжных систем вентиляции приводит к наруше-

нию воздушно-теплого и влажностного режима помещений, способствует переувлажнению наружных ограждающих конструкций, стыковых соединений панелей зданий и приводят к грибково-плесневым образованиям с ухудшением микроклимата квартир [1-4].

В работе [5] авторами представлена методика инженерных расчётов температуры воздуха в приквартирных остеклённых пространствах при стационарных условиях в отсутствии фильтрационных и радиационных потоков. При разработке инженерной методики расчётным путём авторами получены закономерности изменения температур на внутренних и внешних остеклённых поверхностях лоджий с целью учёта снижения величины теплопотерь помещений путём математической модели физических процессов теплообмена на основе критериальных уравнений. Расчёты, выполняемые по данной методике, показали, что приращение температуры воздуха в зависимости от ориентации, радиационных и термодинамических характеристик остеклённых поверхностей, времени года и суток может достигать  $\Delta t = t_1 - t_2 = 22^\circ\text{C}$ , где  $\Delta t$  – приращение температуры воздуха при нагревании его от начальной температуры  $t_1$  до конечной  $t_2$  за счёт солнечной радиации. Эти данные хорошо согласуются с результатами работы [6], в которой экспериментально и теоретически получены значения изменения температуры воздуха в щелевом воздухопроводящем канале в зависимости от погодных условий на величину  $\Delta t = t_1 - t_2 = 5 \div 25^\circ\text{C}$ .

При движении воздуха внутри воздухопроводящего щелевого канала наружный холодный воздух нагревается через его греющие поверхности и устремляется восходящим потоком вверх, создавая при этом дополнительное гравитационное давление, равное

$$P_g = h \cdot g \cdot (\rho_n - \rho_k), \quad (1)$$

где  $h$  – высота воздухопроводящего щелевого канала, определяемая как разность отметок нижнего входного и верхнего выходного отверстий, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_n$  – плотность наружного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_k$  – плотность воздуха при средней температуре в воздухопроводящем канале, кг/м<sup>3</sup>.

Наиболее эффективной является комбинированная приточно-вытяжная система вентиляции герметичных зданий с использованием навесных светопрозрачных вентилируемых фасадов, усовершенствованных конструкций «тёплых» чердаков, трёхступенчатой схемой рекуперации теряемой зданием теплоты и природной теплоты солнечной радиации. Изначально «тёплые» чердаки предназначались для сбора вытяжного вентиляционного воздуха, поступающего из вытяжных каналов в объём «тёплого» чердака с последующим удалением тёплого воздуха через секционную вытяжную шахту в атмосферу. В предлагаемой технологической схеме секционная вытяжная шахта отсутствует, а тёплый вытяжной вентиляционный воздух перед выбросом в атмосферу обменивается теплотой с наружным приточным вентиляционным воздухом в рекуперативном пластинчатом теплообменнике-утилизаторе, расположенном в «тёплом» чердаке, что является второй ступенью рекуперации теряемой зданием теплоты [7].

Третья ступень рекуперации, предусмотренная в предлагаемой технологической схеме, обеспечивается через контактные поверхности совместно проложенных вертикаль-

ных приточных и вытяжных воздуховодов, эффективность теплообменника пропорциональна этажности зданий, так как время контакта при теплообмене приточного и вытяжного воздуха увеличивается от высоты здания.

Теплота, воспринимаемая наружным приточным воздухом, движущимся вдоль теплообменивающих поверхностей навесного вентилируемого фасада и «тёплого» чердака, включает часть теплоты, теряемой зданием через наружные ограждающие горизонтальные (чердачное перекрытие и покрытие) и вертикальные (наружные стены, окна) конструкции в течение всего отопительного периода, а также часть теплоты суммарной прямой и рассеянной солнечной радиации с учётом ориентации здания, географической широты и бытовых тепловыделений. Из уравнения теплового баланса здания [8, с.86] имеем

$$Q_{от} = \Delta Q = Q_{огр} + Q_{вен} - Q_{быт}, \quad (2)$$

где  $Q_{огр}$  – потери теплоты через наружные ограждения зданий, Вт;

$Q_{вен}$  – расход теплоты на нагрев воздуха, поступающего в вентилируемые помещения, Вт;

$Q_{быт}$  – бытовые выделения теплоты в процессе эксплуатации здания, Вт.

Передача теплоты через наружные ограждения здания рассматривается как гармонически изменяющийся тепловой процесс [9], который характеризуется тремя параметрами: среднесуточными значениями теплового потока  $q_{lo}$ , амплитудой колебания  $A_{q1}$  и временем наступления максимума  $Z_{q1}^{max}$ . Передача теплоты при совместном действии разности температур и потока суммарной солнечной радиации  $J$ ,  $(m^2 \cdot ^\circ C) / Bm$ , в дневное время суток рассчитывается по формуле

$$t_{усл} = t_n + \Delta t_p = t_n + \frac{pJ}{\alpha_n}, \quad (3)$$

где  $t_{усл}$  – условная наружная температура,  $^\circ C$ ;

$p$  – коэффициент поглощения тепла солнечной радиации поверхностью ограждения;

$\alpha_n$  – коэффициент теплообмена на наружной поверхности ограждения,  $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

При установке светопрозрачных навесных фасадов на ограждающие конструкции различной ориентации суммарные теплопоступления зависят от количества прямой «S» и рассеянной «D» солнечной радиации

$$q_{II,p} = (S \cdot \kappa_n \cdot \kappa_{инс} + 0,75 D \cdot \kappa_{обл}) \cdot \kappa_{пер} \cdot \kappa_{отр} \cdot \kappa_{атм} \cdot \kappa_{загр}, \quad (4)$$

где  $q_{II,p}$  – теплопоступления за счёт суммарной солнечной радиации,  $Вт/m^2$ ;

$\kappa_n$  – коэффициент проникания солнечной радиации через одинарное остекление;

$\kappa_{инс}$  – коэффициент инсоляции, равный отношению освещённой солнцем поверхности остекления к общей площади остекления;

$\kappa_{обл}$  – коэффициент облучения остеклённой поверхности рассеянной радиацией;

$\kappa_{отр}$  – коэффициент, учитывающий отражённую от земной поверхности перед фасадом здания солнечную радиацию;

$\kappa_{пер}$  – коэффициент, учитывающий затемнение конструкциями крепления навесного фасада;

$\kappa_{атм}$  – коэффициент, учитывающий загрязнение атмосферы.

Количество теплоты, поступающей через светопрозрачный фасад за счёт разности температур, определяется из выражения

$$q_{II,T} = k_{II} \cdot (t_n^{усл} - t_{н.ф.}), \quad (5)$$

где  $k_{II}$  – коэффициент теплопередачи светопрозрачного навесного фасада, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$t_n^{усл}$  – условная наружная температура, °C;

$t_{н.ф.}$  – осреднённая по высоте температура воздуха внутри воздухопроводящего канала, образованного навесным фасадом и наружной поверхностью наружного ограждения, °C.

В ночное время отопительного периода внутри вертикального щелеобразного воздухопроводящего канала наружный воздух подогревается за счёт трансмиссионной теплоты, теряемой зданием через наружные ограждения, и его температура изменяется от  $t_{нач} = t_n$  до  $t_k$  при переходе из вертикального канала в объём «тёплого» чердака, т.е. количество теплоты, передаваемой от наружных поверхностей наружных ограждений наружному воздуху, движущемуся по вертикальному каналу снизу вверх, определяется из выражения

$$Q_{pen1} = 0,28 \cdot Z \cdot \rho \cdot C \cdot (t_k - t_n), \quad (6)$$

где  $Z = 3 \cdot F_n$  – суммарный расход приточного наружного воздуха, равный трёхкратной суммарной площади  $F_n$  вентилируемых помещений, м<sup>3</sup>/ч;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$C$  – теплоёмкость воздуха, кДж/кг;

$t_n$  – начальная температура наружного воздуха в вертикальном канале, °C;

$t_k$  – конечная температура наружного воздуха в верхней части вертикального воздухопроводящего канала перед входом в «тёплый» чердак, °C.

Количество трансмиссионной теплоты, теряемой зданием в ночное время через вертикальные наружные ограждения (стены, окна), оборудованные светопрозрачным навесным фасадом, равно

$$Q_T = \left( \frac{F_{н.с.}}{R_{н.с.}} + \frac{F_{ок}}{R_{ок}} \right) \cdot (t_{\theta} - t_{н.ф.}), \quad (7)$$

где  $F_{н.с.}$  и  $F_{ок}$  – суммарные площади наружных стен и окон, оборудованные навесным фасадом, м<sup>2</sup>;

$R_{н.с.}$  и  $R_{ок}$  – термические сопротивления наружных стен и окон соответственно, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт;

$t_{\theta}$  – температура внутреннего воздуха вентилируемых помещений, °C;

$t_{н.ф.} = \frac{t_n + t_k}{2}$  – осреднённая по высоте температура воздуха внутри воздухопроводящего канала при начальной температуре  $t_n$  и конечной температуре  $t_k$  соответственно, °C.

Приравняв правые части в уравнениях (6) и (7), получим

$$0,28 \cdot Z \cdot \rho \cdot C \cdot (t_k - t_n) = \left( \frac{F_{н.с.}}{R_{н.с.}} + \frac{F_{ок}}{R_{ок}} \right) \cdot (t_g - t_{н.ф.}), \quad (8)$$

Приняв нормативные и фактические значения входящих в формулу (8) величин для односекционного 10 этажного здания с размерами 12х24х30 и коэффициентом оконного остекления  $\kappa_{ост}=0,35$  для Витебска получим уравнение

$$\frac{0,28 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 40 \cdot 1,4 \cdot 1}{1404 / 3,2 + 756 / 1} = \frac{20 - 0,5 \cdot t_k - 0,5 \cdot (-25)}{t_k + 25},$$

которое решается для  $t_k = +1,5^\circ\text{C}$ , т.е. наличие навесного вентилируемого светопрозрачного фасада только за счёт теряемой зданием трансмиссионной теплоты через наружные стены и окна в ночное время без воздействия солнечной радиации обеспечивается нагрев наружного приточного воздуха, движущегося внутри вертикального щелеобразного воздухопроводящего канала, от начальной температуры  $t_{нач} = t_n = -25^\circ\text{C}$  до конечной его температуры при переходе из вертикального канала в объём «тёплого» чердака на величину  $\Delta t_{ноч}^{н.ф.}$ , равную

$$\Delta t_{ноч}^{н.ф.} = t_k - t_n = 1,5 - (-25) = 26,5^\circ\text{C}.$$

Рассуждения по поводу теплообменных процессов, протекающих в объёме «тёплого» чердака, приводят к уравнению

$$0,28 \cdot Z \cdot \rho \cdot C \cdot (t_{м.ч.} - t_k) = \frac{F_{пок}}{R_{пок}} \cdot \left( t_g - \frac{t_{м.ч.} + t_k}{2} \right). \quad (9)$$

Подставив известные величины в уравнение (9), получим

$$\frac{0,28 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 40 \cdot 1,3 \cdot 1}{288 / 6} = \frac{20 - 0,5 \cdot t_{м.ч.} - 0,5 \cdot 1,5}{t_{м.ч.} - 1,5}, \text{ следовательно } t_{м.ч.} = 2,2^\circ\text{C}.$$

В ночное время обычно кухней и ванной пользуются очень редко и совсем не обязательно удалять тёплый воздух из этих помещений, т.к. вредности не выделяются, а оставить вытяжку в объёме 25м³/ч только из туалета, тогда формулу (8) можно представить в виде

$$0,28 \cdot 25 \cdot 6 \cdot 10 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot (t_k - t_n) = \left( \frac{1404}{3,2} + \frac{756}{1,0} \right) \cdot (20 - 0,5 \cdot t_k + 12,5), \quad (10)$$

откуда  $t_k^{ноч} = 23,3^\circ\text{C}$ , т.е. вся теряемая зданием трансмиссионная теплота будет ассимилироваться небольшим количеством воздуха, движущимся по вертикальному щелевидному воздухопроводящему каналу, образованному светопрозрачным навесным фасадом и наружной поверхностью вертикальных наружных ограждений и при этом его температура будет подниматься за счёт рекуперации от начальной  $t_{нач} = t_n = -25^\circ\text{C}$  до конечной при переходе из вертикального канала в объём «тёплого» чердака  $t_k = 23,3^\circ\text{C}$ , обеспечивая нагрев воздуха на величину  $\Delta t = t_k - t_n = 23,3 - (-25) = 48,3^\circ\text{C}$ .

Влияние солнечной радиации на тепловой режим здания, оборудованного солнцепрозрачным навесным вентилируемым фасадом и рекуперативным «тёплым» чердаком без вытяжной шахты, неоднозначно. С одной стороны освещённая солнцем часть навесного фасада воспринимает теплоту солнечной радиации, вызывая значительный прогрев наружной поверхности наружного ограждения, в результате чего перепад температур между внутренними и наружными поверхностями наружного ограждения уменьшается, а при интенсивной инсоляции принимает отрицательные значения. Тогда массив стены становится не источником трансмиссионных потерь теплоты, а работает как отопительная греющая панель помещения, передающая теплоту солнечной радиации внутрь отапливаемого помещения. В этом случае эффект рекуперации трансмиссионной теплоты для нагрева приточного наружного воздуха либо уменьшается, либо полностью отсутствует.

В дневное время отопительного периода количество теплоты, поступающей через светопрозрачный навесной вентилируемый фасад за счёт разности температур и солнечной радиации согласно [10, с. 53] применительно к навесному фасаду, определяется из выражения

$$Q_{н.ф.} = (q' \cdot F'_0 + q'' \cdot F''_0) \cdot \beta_{с.з.} \cdot K_0 \cdot K_a + \frac{t_n - t_e}{R_0} \cdot F_0, \quad (11)$$

где  $q'$  и  $q''$  – количество теплоты, поступающее через одинарное остекление от прямой и рассеянной солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;

$F_0 = F'_0 + F''_0$  – площадь остекления фасада, м<sup>2</sup>;

$F'_0$  и  $F''_0$  – площади остекления фасада, соответственно облучаемые и не облучаемые прямой солнечной радиацией, м<sup>2</sup>;

$\beta_{с.з.}$  – коэффициент теплопропускания солнцезащитных устройств, при их отсутствии  $\beta_{с.з.} = 1$ ;

$R_0$  – сопротивление теплопередаче остеклённой поверхности, (м<sup>2</sup> · °C) / Вт, для одинарного остекления  $R_0 = 0,15$  (м<sup>2</sup> · °C) / Вт;

$t_n$  и  $t_{н.ф.}$  – температура наружного воздуха и осреднённая по высоте температура воздуха внутри воздухопроводящего канала при начальной  $t_n$  и конечной  $t_k$  температурах, °C;

$K_0$  – коэффициент типа остекления, при одинарном остеклении  $K_0 = 1$ ;

$K_a$  – коэффициент, учитывающий аккумуляцию теплоты ограждающими конструкциями, например, для бетона, красного кирпича, известковой штукатурки  $K_a = 0,7$ ; при наличии средств солнцезащиты  $K_a = 1$ .

При расчёте вентиляции величина  $\frac{t_n - t_e}{R_0} \cdot F_0$  не учитывается.

Количество теплоты, передаваемой от нагретой поверхности к воздуху, определяется из выражения

$$Q_{н.п.} = \frac{t_{нов.} - t_{н.ф.}}{R} \cdot F, \quad (12)$$

где  $t_{нов.}$  и  $t_{н.ф.}$  – температура соответственно нагретой поверхности и воздуха внутри воздухопроводящего канала, образованного навесным фасадом и наружной нагретой поверхностью наружного ограждения, °C ;

$F$  – площадь нагретой поверхности наружного ограждения, м<sup>2</sup>;

$R$  – сопротивление теплопередаче от нагретой поверхности к воздуху, определяется по формуле

$$R = \frac{0,086}{\sqrt{v}}, \quad (13)$$

где  $v$  – скорость движения воздуха внутри воздухопроводящего канала, м/с.

Для вертикально расположенного навесного светопрозрачного вентилируемого фасада значения величин  $q'$  и  $q''$ , входящих в формулу (11) определяются

$$q' = (q_{в.н.} + q_{в.р.}) \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2, \quad (14)$$

$$q'' = q_{в.р.} \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2, \quad (15)$$

где  $q_{в.н.}$  и  $q_{в.р.}$  – поступления теплоты соответственно от прямой и рассеянной радиации через одинарное остекление, Вт/м<sup>2</sup>;

$\kappa_1$  – коэффициент, учитывающий загрязнение атмосферы, для чистой атмосферы  $\kappa_1 = 1$ ;

$\kappa_2$  – коэффициент, учитывающий загрязнение поверхности остекления, для чистого стекла  $\kappa_2 = 1$ .

Исходя из принятых величин, формулу (11) можно переписать в виде

$$Q_{н.ф.} = [(q_{в.н.} + q_{в.р.}) \cdot F'_0 + q_{в.р.} \cdot F''_0] \cdot 0,7. \quad (16)$$

В дневное время суток под действием солнечной радиации наружный приточный воздух при движении снизу вверх по воздухопроводящему щелеобразному каналу подогревается от начальной температуры  $t_{нач} = t_n$  до температуры  $t_k^{unc}$  при переходе из вертикального канала в объём «тёплого» чердака, а количество теплоты, воспринимаемой приточным вентиляционным воздухом, равно

$$Q_{пен2} = 0,28 \cdot Z \cdot \rho \cdot C \cdot (t_k^{unc} - t_n), \quad (17)$$

где  $t_k^{unc}$  – конечная температура наружного воздуха в верхней части воздухопроводящего канала перед входом в «тёплый» чердак, подогретого за счёт солнечной радиации, °C .

Приравняв правые части уравнений (16) и (17), получим уравнение

$$[(q_{в.н.} + q_{в.р.}) \cdot F'_0 + q_{в.р.} \cdot F''_0] \cdot 0,7 = 0,28 \cdot Z \cdot \rho \cdot C \cdot (t_k^{unc} - \frac{t_k^{unc} + t_n}{2}), \quad (18)$$

решаемое относительно  $t_k^{unc}$  при всех остальных известных величинах. Более точные значения  $t_k^{unc}$  определяются при решении уравнения (18) для каждого фасада в отдельности.



Вышеизложенная методика позволяет аналитически инженерными методами расчета определить снижение теплопотребления от внешних энергоисточников на цели отопления зданий повышенной теплозащиты и герметичности наружных ограждающих конструкций с использованием навесных вентилируемых светопрозрачных фасадов и технологических чердаков, функционирующих как объемные приточные вентиляционные камеры с многоступенчатой технологической схемой рекуперации возобновляемых вторичных и природных энергоресурсов [11, 12].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грудзинский, М.М. Отопительно-вентиляционные системы зданий повышенной этажности / М.М. Грудзинский, В.И. Ливчак. – М. : Стройиздат, 1982. – 255 с.
2. Рекомендации по проектированию железобетонных крыш с «тёплым» чердаком для многоэтажных жилых зданий // ЦНИИЭП жилища. – Стройиздат, 1986. – 24 с.
3. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2 т. / В.И. Липко. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000.
4. Оголовок вытяжного вентиляционного блока : пат. 5954А / В.И.Липко, В.А. Борвонов ; дата публ.: 30.03.2004.
5. Хрусталёв, Б.М. К вопросу теплового режима приквартирных остеклённых пространств / Б.М. Хрусталёв, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов // Строительная наука и техника. – 2011. – № 1. – С. 17–21.
6. Устройство критичной вентиляции здания : пат. 892 / В.И. Липко, А.Н. Бендо ; дата публ.: 30.06.2003.
7. Отопительно-вентиляционная система здания : пат. 1134 / В.И Липко ; дата публ.: 30.12.2003.
8. Богословский, В.Н. Отопление : учебник для вузов / В.Н. Богословский, А.Н. Сканапи. – М. : Стройиздат, 1991. – 735 с.
9. Богословский, В.Н. Тепловой режим здания / В.Н. Богословский. – М. : Стройиздат, 1979. – 248 с.
10. Русланов, Г.В. Отопление и вентиляция жилых и гражданских зданий: Проектирование : справ / Г.В. Русланов, М.Я. Розкин, Э.Л. Ямпольский. – Киев : Будівельник, 1983. – 272 с.
11. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение чердачных зданий / В.И. Липко, С.В. Ланкович, А.С. Лапезо // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – С. 89–97.
12. Василевич, Н.А. Энергоресурсоэффективные системы тепловоздухоснабжения жилых зданий повышенной теплозащиты / Н.А. Василевич, В.И. Липко, О.Н. Широкова // Материалы докладов Международной научно-технической конференции. – Витебск, 2015. – С. 68–70.

УДК 697.329, 697.952.2

**ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОЕ УСТРОЙСТВО ИНСОЛЯТОРА  
ДЛЯ ПОДОГРЕВА НАРУЖНОГО ПРИТОЧНОГО ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА  
ЗА СЧЕТ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ**

*В.И. Липко, Н.В. Кундро*

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: kafedratgsv@mail.ru

*Рассмотрена конструкция устройства, позволяющего использовать солнечную радиацию для нагрева приточного воздуха, подаваемого в вентилируемое помещение. Предлагаемая схема позволяет значительно снизить затраты здания на нагрев инфильтрующегося воздуха, использовать возобновляемые источники энергии*

*Ключевые слова: энергосбережение, воздухообеспечение, солнечная радиация, комфорт, микроклимат.*

**ENERGY AND RESOURCE EFFECTIVE SOLAR COLLECTOR  
FOR HEATING OUTDOOR SUPPLY VENT AIR  
BY SOLAR RADIATION**

*V. Lipko, N. Kundro*

Polotsk State University, Belarus.

email: kafedratgsv@mail.ru

*The article deals with the design of the device, allowing the use of the solar radiation to heat fresh air ventilated. The proposed scheme can significantly reduce the consumption of the building for infiltration air heating, use of renewable energy sources.*

*Keywords: energy conservation, air, solar radiation, comfort, microclimate.*

Вопрос снижения потребления энергии в любом виде стоит на первых позициях любого государства. Развитие технологий с применением возобновляемых ресурсов – одна из задач, поставленных Департаментом по энергоэффективности. Территория Республики Беларусь расположена в средних широтах, и хотя количество солнечных дней незначительно, использование «бесплатного» источника энергии в различных конструкциях приобретает большую популярность.

Значительное количество энергии в жилом комплексе расходуется на нагрев инфильтрующегося воздуха. Для снижения затрат на отопление и вентиляцию зданий существуют различные устройства. Т.к. энергии солнца в наших широтах недостаточно для использования с теплоносителем вода, то более выгодным рассматривается вопрос о применении солнечных коллекторов различных видов для нагрева воздуха.

Одним из способов минимизации затрат, а также сроков монтажа является применение устройства, изображенного на рис. 1а [1], автором которой является Б.Роджерс. Прохладный воздух из помещения засасывается в коллектор нагретым воздухом, который из коллектора поступает в помещение за счет сил гравитации. Данная конструкция представляет собой прямоугольный короб, размещаемый непосредственно под оконным проемом.

Внутри устройства расположена пластина, покрашенная в черный цвет и являющаяся тепло-воспринимающим элементом. Пластина за счет солнечной радиации нагревается и отдает теплоту проходящему около неё воздуху. Другая, аналогичная конструкция представлена на рис. 1б. Отличие её в том, что коллектор наклонен относительно солнечных лучей. Угол наклона конструкции рассчитан таким образом, чтобы увеличить теплосъем с поверхности пластины, т.к. при попадании лучей под углом  $90^\circ$  интенсивность солнечной радиации возрастает.

Воздухообмен в таких конструкциях осуществляется в режиме рециркуляции без добавления свежего наружного, обогащенного кислородом, воздуха, что ограничивает их применение по санитарно-гигиеническим требованиям.

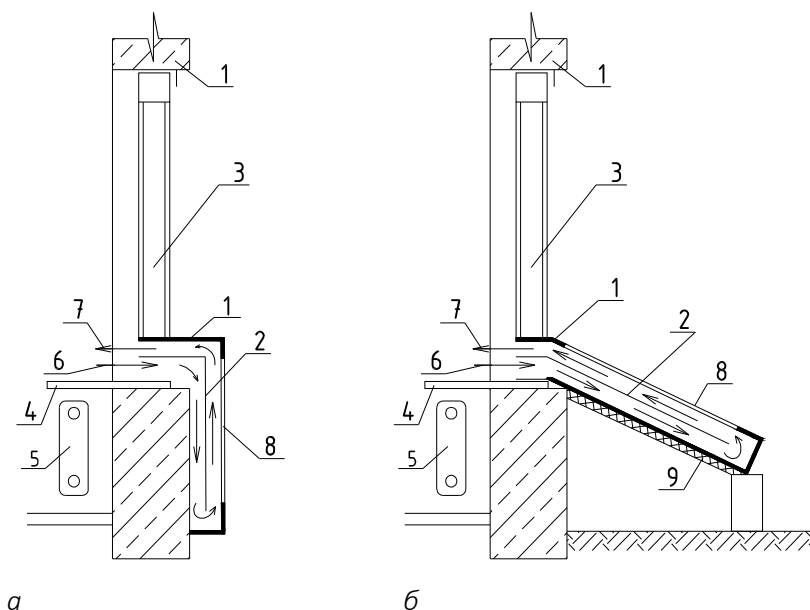


Рисунок 1. – Солнечный коллектор, встроенный в оконную коробку:

*а* – вертикальный вариант исполнения; *б* – наклонный вариант исполнения;

1 – существующая стена дома; 2 – черная нагревательная пластина; 3 – существующее окно; 4 – подоконная плита; 5 – отопительный прибор; 6 – прохладный воздух помещения; 7 – нагретый воздух помещения; 8 – стекло или светопрозрачный пластик; 9 – тепловая изоляция

Предлагаемая конструкция заполнения светового проема с инсолятором представляет собой солнечный коллектор, встроенный в оконную коробку. Основное назначение устройства – создание воздухообменного процесса внутри зданий с функцией подогрева приточного воздуха за счет солнечной радиации.

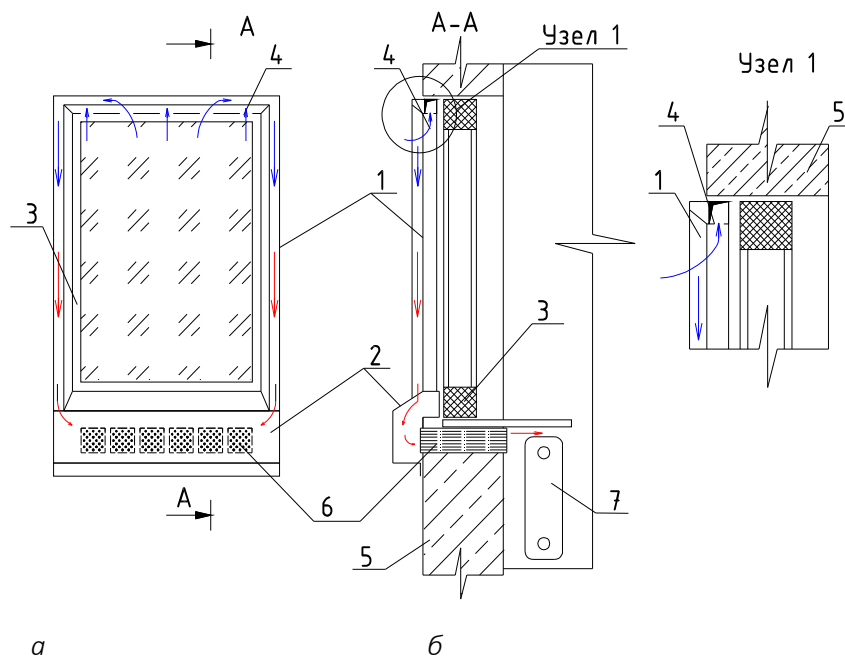
На рисунке 2а показан фасад, а на рисунке 2б – разрез А-А установки солнечного инсолятора, встроенного в оконную коробку на наружной стене здания.

Конструктивно солнечный инсолятор, встроенный в оконную коробку 3, выполнен в виде накладного устройства 1 с расположенными сверху воздухоприемными отверстиями 4. Инсолятор 1, выполненный из металла, обрамляет по контуру весь оконный проем, а в нижней части конструкции воздухоотливная камера 2 осуществляет одновременно функцию водоотливного карниза и прикрывает входные отверстия расположенных в наружной стене 5 под окном приточных вентиляционных блоков РПВЭ 6[2, 3, 4].

Принцип работы солнечного инсолятора встроенного в оконную коробку, заключается в том, что наружный воздух с температурой  $t_n$  поступает через воздухоприемные отверстия 4 инсолятора 1, расположенные в верхней части. Солнечная радиация нагревает

стенки инсолятора 1 и по мере перемещения воздуха вдоль каналов коробчатого сечения воздуха нагревается за счет теплообмена со стенками, попадает внутрь воздухоборной камеры 2. За счет разрежения, создаваемого системой естественной вытяжной вентиляции, воздух проходит отверстия приточного вентиляционного блока 6. В блоке 6 температура наружного воздуха также повышается благодаря трансмиссионным процессам.

Нагрев за счет солнечной радиации может достигать значительных величин, что существенно снижает отопительную нагрузку на систему отопления здания. При этом постоянная циркуляция обогащенного кислородом наружного приточного воздуха значительно улучшает микроклимат, комфортные условия проживания и повышает экологическую безопасность жизнедеятельности. Основы расчета теплообмена и аэродинамических характеристик в вентиляционных блоках были приведены в [5, 7].



**Рисунок 2. – Схема установки инсолятора на наружной стене здания:**  
 1 – инсолятор; 2 – воздухоборная камера; 3 – оконная рама, 4 – воздухоприемные отверстия;  
 5 – наружная стена; 6 – приточный вентиляционный блок РПВЭ, 7 – отопительный прибор

Данная конструкция обеспечивает естественный приток нагретого наружного приточного воздуха в зданиях с герметичными конструкциями, при этом создается благоприятный микроклимат помещения, исключается появление избыточной влажности воздуха помещений и строительных конструкций, значительно снижаются затраты на отопление здания. Кроме этого, проникновение шума и пыли в помещение как при естественном проветривании отсутствует [6].

Создание конструктивно простого и экологически эффективного устройства обеспечивает устойчивую работу естественной вентиляции с использованием для подогрева наружного приточного вентиляционного воздуха теплоты возобновляемой солнечной радиации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Переоборудование здания в солнечный дом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://journal.esco.co.ua/2002\\_5/art49.htm](http://journal.esco.co.ua/2002_5/art49.htm). – Дата обращения: 15.02.2018.

2. Воздухоприточное устройство : пат. 4963А / В.И. Липко ; дата публ.: 30.03.2003.
3. Рекуперативный приточный вентиляционный элемент: пат. 4651А. / В.И. Липко, В.А. Борвонов ; дата публ.: 30.09.2002.
4. Вентиляционное приточное устройство : пат. 4410С1 / В.И. Липко, В.А. Борвонов ; дата публ.: 30.03.02.
5. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2 т. / В.И. Липко. – Т. 1. – Новопо-лоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 300 с.
6. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2 т. / В.И. Липко. – Т. 2. – Новопо-лоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 246 с.
7. Липко, В.И. Теория исследования работы рекуперативных приточных вентиляционных элементов в инновационной технологии поддержания микроклимата герметизированных зданий [Электронный ресурс] / В.И. Липко, Н.В. Кундро // Вестник науки и образования Северо-Запада Рос-сии. – 2015. – Т. 1, № 1.

МЕТОДИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА РЕГУЛИРУЕМОЙ ИНФИЛЬТРАЦИИ  
ЧЕРЕЗ НАВЕСНЫЕ ВЕНТИЛИРУЕМЫЕ ФАСАДЫ  
И РЕКУПЕРАТИВНЫЕ ПРИТОЧНЫЕ ВЕНТБЛОКИ РПВЭ КОНСТРУКЦИИ  
ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

В.И. Липко, Н.В. Кундро, А.С. Лапезо  
Полоцкий государственный университет, Беларусь  
email: kafedratgsv@mail.ru

*Представлена методика аэродинамического расчета инфильтрующегося воздуха многоэтажных зданий с вентилируемыми навесными фасадами. Расчет предполагает определение аэродинамического сопротивления представленной конструкции и последующего подбора рекуперативных приточных вентиляционных блоков типа РП ВЭ, разработанных на базе «Полоцкого государственного университета»*

*Ключевые слова: аэродинамический расчет, инфильтрация, рекуперация, воздухообмен, наружный приточный воздух, комфорт, микроклимат.*

TECHNIQUE OF AERODYNAMIC CALCULATION REGULATED INFILTRATION  
THROUGH THE VENTILATED FACADES  
AND RECUPERATIVE AIR VENT BLOCKS CONSTRUCTION  
OF POLOTSK STATE UNIVERSITY

V. Lipko, N. Kundra, A. Lapezo  
Polotsk State University, Belarus  
email: kafedratgsv@mail.ru

*In the article there is the technique of aerodynamic calculation of infiltration air multi-storey buildings with curtain ventilated facades. The calculation involves the determination of aerodynamic resistance provided by the construction and subsequent selection of the turndown inlet vent blocks, developed on the basis of the «Polotsk State University»*

*Keywords: aerodynamic calculation, infiltration, recovery, outdoor air supply, comfort, microclimate.*

Строительство энергоэффективных зданий с использованием материалов, обладающих высокими теплозащитными характеристиками. Однако данные конструкции зачастую предполагают снижение воздухопроницаемости здания в целом. Поддержание требуемого воздухообмена в таких зданиях для соответствия нормативным значениям возможно только при организованном притоке наружного воздуха. При строительстве здания использование блоков РПВЭ, разработанных на базе «Полоцкого государственного университета», помогает решить данный вопрос.

Рассмотрим жилое девятиэтажное здание с навесными вентилируемыми фасадами и рекуперативными вентблоками с инновационной технологией управляемой инфильтрации по схеме (рис. 1 а, б, в) [1]. Для расчета принимаем помещение жилой комнаты, ориентированной на восток, с размерами 4,6×4,5 м, высота этажа 3,0 м, размер оконного проема 1,5×1,5 м. Значения приведенного сопротивления теплопередаче для наружных стен –

3,2 м<sup>2</sup>×°С/Вт. Количество воздуха, подаваемого в помещение жилой комнаты по нормативам 3м<sup>3</sup>/(ч·м<sup>2</sup>):

$$L_{\text{ж.к.}} = F_{\text{ж.к.}} \times L_{\text{ж.к.}}^{\text{норм}} = (4,6 \times 4,5) \times 3 = 62 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

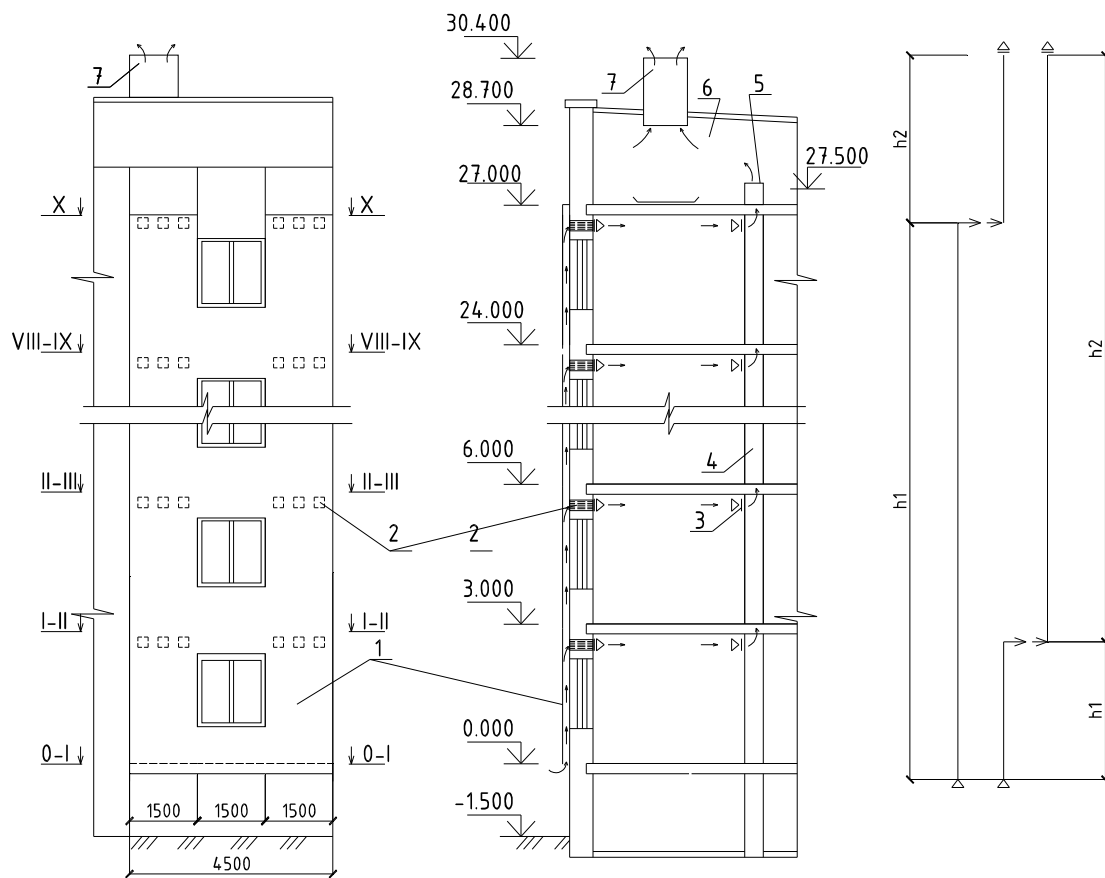


Рисунок 1. – Схема многоэтажного здания с энергоэффективным навесным фасадом и рекуперативными приточными блоками РПВЭ:

1 – навесной светопрозрачный фасад; 2 – рекуперативный вентиляционный приточный блок; 3 – вытяжная решетка; 4- вытяжной вентиляционный блок; 5 – оголовок шахты вытяжной системы; 6 – объем теплого чердака; 7 – вытяжная шахта

Потери теплоты через ограждающие конструкции можно определить по формуле:

$$Q_{\text{nc}} = \frac{F_{\text{nc}}}{R_{\text{nc}}} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot (1 + \Sigma\beta) \cdot n \quad (1)$$

где  $F_{\text{nc}}$  – площадь наружной стены, м<sup>2</sup>;

$R_{\text{nc}}$  – приведенного сопротивления теплопередаче, м<sup>2</sup>×°С/Вт;

$t_{\text{в}}, t_{\text{н}}$  – температуры соответственно внутреннего и наружного воздуха, °С;

$\Sigma\beta$  – сумма поправок, учитывающих дополнительные потери теплоты на ориентацию ограждения;

$n$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху.

При определении теплотерьчерез ограждения стен помещением кухни было получено значение:

$$Q_{н.с.}^I = \frac{4,5 \cdot 3,0 - 1,5 \cdot 1,5}{3,2} \cdot (18 + 25) \cdot (1 + 0,1) = 166 \text{ Вт.}$$

Расход теплоты на нагрев воздуха от температуры  $t_n$  до  $t_k$  можно определить по формуле

$$Q = 0,28 \cdot L_{н.ф.} \cdot c \cdot \rho_n \cdot (t_k - t_n), \quad (2)$$

тогда с учетом полной ассимиляции теплоты, поступающей в объем навесного фасада, можно определить температуру воздуха в сечении I-II.

$$t_k = \frac{Q}{0,28 \cdot L_{н.ф.} \cdot c \cdot \rho_n} + t_n \quad (3)$$

Подставив значения в уравнение определения температуры получим температуру наружного воздуха со стороны фасада  $-23,91^\circ\text{C}$ .

$$t_k^{I-II} = \frac{166}{0,28 \cdot 558 \cdot 1,0 \cdot 1,423} - 25 = -24,25^\circ\text{C}$$

Следовательно, теплотери наружной стеной, определяемой по формуле (1) в пределах второго этажа составят:

$$Q_{н.с.}^2 = \frac{4,5 \cdot 3,0 - 1,5 \cdot 1,5}{3,2} \cdot (18 + 24,25) \cdot (1 + 0,1) = 163 \text{ Вт,}$$

а температура в сечении II-III:

$$t_k^{II-III} = \frac{163}{0,28 \cdot 496 \cdot 1,0 \cdot 1,419} - 24,25 = -23,43^\circ\text{C}.$$

Аналогично производятся расчеты для всего фасада. Результаты сведены в таблицу 1. Общее снижение потерь теплоты через ограждающие конструкции по всем этажам составит 149 Вт. Средняя температура воздуха в навесном фасаде  $-18,95^\circ\text{C}$ .

По данным теплотехнического расчета (см. табл. 1) под навесным фасадом вдоль стены первого этажа температура наружного воздуха изменяется от  $t_{нач} = -25^\circ\text{C}$  до  $t_{кон} = -24,25^\circ\text{C}$ , тогда при движении наружного воздуха в щелевом канале навесного фасада создается естественное гравитационное давление

$$P_{гр.}^{н.ф.} = h_1 \cdot g \cdot (\rho_{нач} - \rho_{кон}) = 2,5 \cdot 9,8 \cdot (1,423 - 1,419) = 0,105 \text{ Па.} \quad (4)$$

Естественное гравитационное давление, создаваемое вытяжным каналом из помещения 1 этажа

$$P_{гр.}^{выт.} = h_2 \cdot g \cdot (\rho_n - \rho_v) = 27,9 \cdot 9,8 \cdot (1,423 - 1,213) = 57,567 \text{ Па.} \quad (5)$$



Таблица 1. – Расчет теплотерь и температуры воздуха в навесном фасаде

Номер этажа	Потери теплоты ограждением, Вт	Температура наружного воздуха в сечении навесного фасада, $t_{н.ф.}, ^\circ\text{C}$		Плотность наружного воздуха $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	Расход воздуха в вентилируемом фасаде $L_{н.ф.}$	Перепад температур в сечении навесного фасада $\Delta t, ^\circ\text{C}$	Снижение потерь теплоты через наружную стену $\Delta Q$ , Вт
		на входе	на выходе				
1	166	-25	-24,25	1,423	558	0,75	0
2	163	-24,25	-23,43	1,419	496	0,83	3
3	160	-23,43	-22,50	1,414	434	0,93	6
4	157	-22,50	-21,43	1,409	372	1,07	9
5	152	-21,43	-20,18	1,403	310	1,25	14
6	148	-20,18	-18,65	1,396	248	1,53	18
7	142	-18,65	-16,69	1,388	186	1,96	24
8	134	-16,69	-13,88	1,377	124	2,80	32
9	123	-13,88	-8,68	1,362	62	5,20	43

Суммарное естественное гравитационное давление для помещения 1-го этажа составляет

$$P_{гр}^{\Sigma} = P_{гр}^{н.ф.} + P_{гр}^{выт.} = 0,105 + 57,567 = 57,672 \text{ Па.} \quad (6)$$

Естественное гравитационное давление является движущей силой циркуляции воздуха при естественной вентиляции, а силой торможения является аэродинамическое сопротивление этому движению, которое состоит из потерь давления на трение и местные сопротивления воздухопроводов или каналов, по которым осуществляется перемещение воздуха.

При аэродинамическом расчете инфильтрации через вентилируемые навесные светопрозрачные фасады и рекуперативные вентиляционные блоки РПВЭ необходимо учитывать аэродинамическое сопротивление при проходе воздуха через щелевые каналы  $P_{н.ф.}$  навесного фасада, сопротивление вентблоков  $P_{бл}$  и сопротивление вытяжных каналов вентиляционной системы  $P_{в.к.}$  в суммарном выражении

$$P_{\Sigma} = P_{н.ф.} + P_{бл} + P_{в.к.}, \text{ Па.} \quad (7)$$

Конструктивно щелевой канал навесного фасада имеет размеры  $f = 5 \cdot 0,1 = 0,5 \text{ м}^2$ .

Расход воздуха меняется поэтажно от  $L_{пр} = 558 \text{ м}^3/\text{ч}$  на уровне 1-го этажа до  $L_{пр} = 62 \text{ м}^3/\text{ч}$  на уровне 9-го этажа. Скорость воздуха на начальном участке на уровне 1-го этажа равна

$$v_k^I = \frac{558}{3600 \cdot 5,0 \cdot 0,1} = 0,31 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$d = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 0,1}{5 + 0,1} = 0,196 \text{ м.} \quad (8)$$

Критерий Re определится из выражения

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{0,31 \cdot 0,196}{11,21 \cdot 10^{-6}} = 5422. \quad (9)$$

Коэффициент сопротивления трения по формуле Альтшуля

$$\lambda_{тр} = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{Re} + \frac{k}{d} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{5422} + \frac{0,1}{0,196} \right)^{0,25} = 0,0935. \quad (10)$$

Потери давления на трение

$$P_{тр} = \frac{\lambda_{тр}}{d} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} \cdot l = \frac{0,0935}{0,196} \cdot \frac{0,31^2 \cdot 1,421}{2} \cdot 2,5 = 0,081 \text{ Па}. \quad (11)$$

При входе воздух в конструкцию навесного фасада имеет местное сопротивление в виде внезапного сужения, коэффициент сопротивления составляет 0,5, тогда потери давления составят

$$Z = \zeta \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} = 0,5 \cdot \frac{0,31^2 \cdot 1,423}{2} = 0,034 \text{ Па}. \quad (12)$$

$$P_{\Sigma} = P_{тр} + Z = 0,081 + 0,034 = 0,116 \text{ Па}. \quad (13)$$

При движении наружного воздуха вверх по щелевому каналу навесного фасада сечение остается постоянным, а расход воздуха уменьшается и потери давления снижаются до минимума.

Потери давления в рекуперативных вентблоках РПВЭ зависят от скорости в проходных каналах и при  $d_k = 0,009$  м и скорости  $v_k = 2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{2,5 \cdot 0,009}{13,28 \cdot 10^{-6}} = 1938;$$

$$\lambda_{тр} = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1938} = 0,033;$$

$$P_{бл} = \sum \zeta \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} + \lambda_{тр} \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} = \left( \sum \zeta + \lambda_{тр} \frac{l}{d} \right) \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2}; \quad (14)$$

$$P_{бл} = \left( 2,7 + 0,033 \cdot \frac{0,3}{0,009} \right) \cdot \frac{2,5^2 \cdot 1,419}{2} = 16,856 \text{ Па}.$$

Потери давления в вытяжных каналах вентиляционных систем с  $d_k = 0,18$  м и скорости  $v_k = 0,5$  м/с.  $Re = v \cdot d / \nu = 0,5 \cdot 0,18 / 15,06 \cdot 10^{-6} = 5976$ , а потери давления зависят от высоты канала в зависимости от этажности и максимальные значения составляет потеря давления в вытяжных каналах из помещения 1-го этажа

$$\lambda_{тр} = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{Re} + \frac{k}{d} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{5976} + \frac{0,1}{0,18} \right)^{0,25} = 0,0954;$$

$$P_{в.к.} = \left( 2,9 + 0,0954 \cdot \frac{27,9}{0,18} \right) \cdot \frac{0,5^2 \cdot 1,213}{2} = 2,682 \text{ Па}.$$

Суммарные потери давления составят

$$P_{\Sigma} = P_{н.ф} + P_{бл} + P_{в.к.} = 0,116 + 16,856 + 2,682 = 19,654 \text{ Па}.$$

Поскольку на 1-ом этаже  $P_{гр}^I = 57,672$  Па, а потери давления составляют  $P_{\Sigma} = 19,654$  Па, то обеспечивается превышение  $P_{гр}$  сил движения против сил торможения  $P_{\Sigma}$  и перепад давлений составляет

$$\Delta P_{расп} = P_{гр} - P_{\Sigma} = 57,672 - 19,654 = 38,017 \text{ Па}$$

и обеспечивает стабильный режим естественной циркуляции воздуха, исключающий опрокидывание вентиляции.

Аналогичны расчеты для остальных этажей. Результаты выполненных расчетов при подборе ветблоков РПВЭ сведены в таблицу 2.

Таблица 2. – Результаты подбора ветблоков РПВЭ в зависимости от этажности помещений

$N_{эт}$	$P_{гр}^{\Sigma}$ , Па	$P_{н.ф.}$ , Па	$P_{бл.}$ , Па	$P_{в.к.}$ , Па	$P_{\Sigma}$ , Па	$\Delta P_{расп.}$ , Па	$v_k$ , м/с	$l_k$ , м <sup>3</sup> /ч	$n_k$ , шт	$n_b$ , шт
1	57,672	57,672	16,856	2,683	19,654	38,017	7,309	1,673	37,1	3
2	51,861	51,861	16,800	2,442	19,448	32,413	6,749	1,545	40,1	3
3	46,373	46,373	16,737	2,201	19,236	27,138	6,175	1,414	43,9	3
4	41,278	41,278	16,666	1,959	19,016	22,262	5,593	1,280	48,4	3
5	36,669	36,669	16,584	1,718	18,786	17,883	5,013	1,147	54,0	4
6	32,716	32,716	16,484	1,477	18,539	14,177	4,463	1,022	60,7	4
7	29,711	29,711	16,358	1,236	18,266	11,445	4,010	0,918	67,5	5
8	28,313	28,313	16,181	0,995	17,944	10,370	3,817	0,874	71,0	5
9	30,889	30,889	15,863	0,753	17,481	13,408	4,340	0,994	62,4	4

Предлагаемая инновационная технология управляемой инфильтрации обеспечивает нормативный воздухообмен для всех помещений здания, что подтверждается графически на представленном рис. 2, где на графике показана зависимость величины остаточного гравитационного давления  $\Delta P_{гр}$  для вентилируемых помещений, расположенных на разных этажах, при расчетах по действующей нормативной базе и по предлагаемой инновационной технологии с навесными вентилируемыми светопрозрачными фасадами и рекуперативными приточными ветблоками РПВЭ, при которой обеспечивается минимальный перепад давлений  $\Delta P_{расп} = 10,37$  Па при инфильтрации, что создает стабильный аэродинамический режим естественной циркуляции воздуха, исключающий опрокидывание вентиляции.

Из графика (см. рис. 2) видно, что максимальное значение остаточного естественного гравитационного  $\Delta P_{гр} = 33,340$  Па для помещения первого этажа, рассчитанного по действующим нормативам меньше минимального значения остаточного естественного давления  $\Delta P_{гр} = 38,017$  Па, рассчитанного по предлагаемой инновационной технологии управляемой инфильтрации наружного воздуха.

По величине нормативного воздухообмена вентилируемого помещения  $L_i = 3 \cdot F_{п.} \frac{m^3}{ч}$  определяется общее количество каналов  $n_k = \frac{L_i}{l_k}$ , шт. После определения количества каналов в каждом ветблоке РПВЭ определяется их количество для установки в помещении. Данные выполненных расчетов сведены в таблицу 2.

Так как в методике подбора ветблоков РПВЭ заложен принцип нейтрализации избыточного давления, аналогичный по действию установке диафрагм или других устройств, применяемых при наладке и регулировке систем вентиляции, то такая технология обеспечивает стабильный аэродинамический режим при эксплуатации герметизированных помещений вне зависимости от этажности и внешних воздействий.

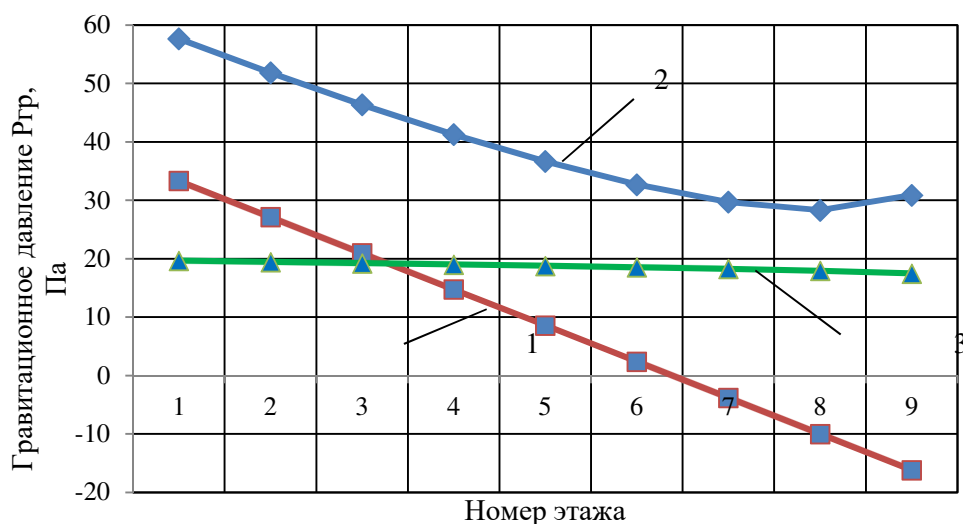


Рисунок 2. – График зависимости изменения остаточного естественного гравитационного давления  $\Delta P_{гр}$  от этажности естественного вентилируемых помещений:

1 – изменение  $\Delta P_{гр}$  по действующей нормативной базе от этажности помещений;  
 2 – изменение  $\Delta P_{гр}$  по предлагаемой технологии; 3 – потери давления в предлагаемой конструкции

За счет снижения энергоресурсопотребления предлагаемая инновационная технология тепловоздухоснабжения зданий с использованием навесных вентилируемых светопрозрачных фасадов и рекуперативных вентблоков РПВЭ позволяет обеспечить регулируемый аэродинамический режим воздуховоснабжения естественного вентилируемых помещений за счет инфильтрации со значительным снижением теплотребления на отопление и вентиляцию благодаря использованию вторичных и природных энергоисточников.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования = Будаўнічая тэхніка. Будаўнічыя нормы праектавання : ТКП 45-2.04-43-2006. – Введ. 29.12.2006 (с отменой на территории РБ СНБ 2.04.01-97). – Минск : Минскстройархитектура, 2006. – 36 с.
2. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха = Ацяпленне, вентыляцыя і кандыцыянаванне паветра : СНБ 4.02.01-03. – Введ. 30.12.2003 (с отменой на территории РБ СНиП 2.04.05-91). – Минск : Минскстройархитектура, 2004. – 78 с.
3. Липко В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2 т. / Липко, В.И. – Т. 1. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 300 с.
4. Липко В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2 т. / Липко, В.И. – Т. 2. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 246 с.
5. Липко, В.И. Теория исследования работы рекуперативных приточных вентиляционных элементов в инновационной технологии поддержания микроклимата герметизированных зданий [Электронный ресурс] / В.И. Липко, Н.В. Кундро // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1, № 1.
6. Липко, В.И. Методология построения математической модели инновационной технологии тепловоздухоснабжения герметизированных зданий. / В.И. Липко, Н.В. Кундро // Материалы 4-й международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию строительного факультета и 85-летию БГИТУ. – Т. 2. – Брянск, 2015.
7. Рекуперативный приточный вентиляционный элемент : пат. 4651А. МПК F24F 13/08. 1С1 ВУ / В.И. Липко, В.А. Борвонов ; дата публ.: 30.09.2002.
8. Вентиляционное приточное устройство : пат. 4410С1 / В.И. Липко, В.А. Борвонов ; дата публ.: 30.03.02.

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕПЛОВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ  
С РЕГУЛИРУЕМОЙ ИНФИЛЬТРАЦИЕЙ  
ЧЕРЕЗ ВЕНТИЛИРУЕМЫЕ СВЕТОПРОЗРАЧНЫЕ НАВЕСНЫЕ ФАСАДЫ  
И РЕКУПЕРАТИВНЫЕ ПРИТОЧНЫЕ ВЕНТБЛОКИ РПВЭ

В.И. Липко, Н.В. Кундро, А.С. Лепезо

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: kafedratgsv@mail.ru

*Рассмотрен вопрос организации естественного воздухообмена в зданиях. Представлена усовершенствованная конструкция фасада здания со светопрозрачными элементами и рекуперативными приточными вентблоками РП ВЭ. Предлагаемая схема позволяет значительно снизить затраты здания на нагрев инфильтрующегося воздуха, использовать солнечную радиацию и трансмиссионную теплоту для нагрева наружного воздуха, подаваемого в помещение.*

*Ключевые слова: энергосбережение, управляемая естественная вентиляция, фасад, наружный приточный воздух, солнечная радиация, комфорт, микроклимат.*

ENERGY AND RESOURCE SAVING TECHNOLOGY HEAT AND AIR SUPPLY  
WITH REGULATED INFILTRATION  
THROUGH THE VENTED LIGHT-TRANSPARENT CURTAIN WALLS  
AND RECUPERATIVE AIR VENT BLOCKS

V. Lipko, N. Kundro, A. Lapezo

Polotsk State University, Belarus

email: kafedratgsv@mail.ru

*The article deals with the question of the organization of natural ventilation in buildings. Presented to the advanced design of the light-transparent curtain wall elements and recuperative air vent blocks. The proposed scheme can significantly reduce the cost of the building for heating infiltration air, use solar radiation and transmission warmth to heat outdoor air supplied into the room.*

*Keywords: energy saving, managed by natural ventilation, the facade, the external air supply, solar radiation, comfort, microclimate.*

Вопросы энергетической безопасности в Республике Беларусь являются приоритетным направлением в промышленности и экономике нашей страны. Независимость от импорта топливных ресурсов – задача, поставленная перед всеми направлениями науки и технологии. Одним из основных потребителей энергоносителей, после производственного, является жилищно-коммунальный комплекс. Здания и сооружения, построенные до 2000 года, имеют значительные потери теплоты в отопительный период, т.к. их ограждающие конструкции не соответствуют действующим нормативам по приведенному сопротивлению теплопередаче.

Одним из решений по снижению тепловой нагрузки зданий является их тепловая реабилитация, проводимая в рамках Государственной программы «Энергосбережение» на

2016 – 2020 годы. Применение «термошубы» и «евроокон» уменьшает потери теплоты зданиями, делает проживание более оптимальным с точки зрения теплового комфорта. Однако использование теплоизоляционных материалов и конструктивных элементов с низкими коэффициентами воздухопроницаемости приводит к негативным явлениям. Снижение воздухообмена помещений повышает относительную влажность помещений. Подверженные влаге, ограждающие конструкции снижают свои теплозащитные свойства. Концентрация выделяющихся газов и пылей ухудшает микроклимат помещений и может привести к ухудшению здоровья проживающих.

Таким образом, сохранение воздухообмена помещений в рамках нормативных значений решает две задачи:

- сохраняет здание от излишних потерь теплоты вместе с удаляемым вытяжным воздухом;
- обеспечивает комфортное проживание с воздушно-тепловым режимом, соответствующем ТНПА.

Жилой фонд Республики Беларусь в основной части составляют многоэтажные жилые здания, вентиляция в которых осуществляется естественным путем за счет гравитационных сил давления из-за разности температур внутреннего и наружного воздуха и ветрового давления. Воздухообмен помещений должен учитывать порядок использования помещений, т.к. в разное время эксплуатации помещений (приготовление пищи, принятие ванны и т.д.), его величина может колебаться в пределах 10–100%. Согласно СНБ 3.02.04-03 «Жилые здания» для воздухообмена кухонь и санитарных узлов нормативное значение составляет не менее 60–90 м<sup>3</sup>/ч и 50 м<sup>3</sup>/ч соответственно, а для жилых комнат – исходя из площади помещения, но не менее 3 м<sup>3</sup>/ч·м<sup>2</sup>.

Вытяжная система вентиляции с естественным побуждением зачастую не обеспечивает воздухообмен в квартире при отсутствии организованного притока, работает нестабильно. Главную роль при воздухообмене в зданиях играют окна. Естественная вентиляция при низкой воздухопроницаемости окон сводится к нулю. Для улучшения микроклимата жилья вынуждены производить проветривание с помощью форточек или фрамуг. Однако в зимний период года это не всегда возможно – возникает проблема регулирования положения створки или проветривание производится кратковременно.

Разработан ряд различных конструкций, предлагающих использование механических устройств для работы системы вентиляции, но использование дополнительных энергетических затрат приведет к удорожанию эксплуатации, а также возможному появлению шума.

Примером может послужить установка приточных клапанов, предусмотренных для организации притока в помещения. Устройство просто по конструкции (рис. 1) и предусматривает подачу наружного воздуха в помещение через решетку 7 и сетку 6. Пройдя по пластиковой трубе 4 с тепло- и шумоизоляцией 5, воздух проходит воздушный фильтр 3 и попадает в помещение через диффузор 1. Однако данный клапан обладает рядом недостатков – дороговизна, сложность конструкции, невозможность очистки сетки 6 со стороны улицы. Кроме того, данное устройство не нагревает наружный воздух и подает его в помещение холодным.

Для создания устойчивого притока наружного воздуха в помещения и стабилизации воздушно-теплого баланса предлагается конструкция, позволяющая использовать солнечную радиацию и естественное гравитационное давление в качестве рационального источника сохранения оптимального микроклимата помещений.

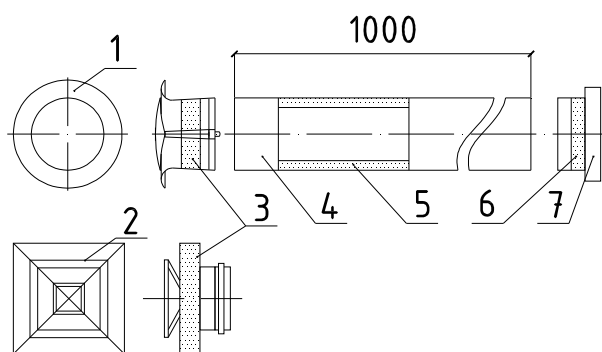


Рисунок 1. – Конструкция стенового приточного клапана:

1 – внутренний диффузор; 2 – наружный диффузор; 3 – воздушный фильтр;  
4 – пластиковая труба; 5 – тепло- и шумоизоляция; 6 – сетка; 7 – наружная решетка

Конструкция представлена на рис. 2. Работа такой конструкции заключается в следующем. Наружный приточный воздух проникает под навесной светопрозрачный фасад 1 через щелевые зазоры 2. Для интенсификации процесса нагрева наружного воздуха со стороны улицы светопрозрачные элементы имеют тонировку или окрашиваются в темный цвет. Таким образом, образующийся воздушный поток попадает в пространство, выполненного по схеме солнечного коллектора. По мере движения вверх наружный воздух нагревается за счет теплоты солнечной радиации со стороны навесного фасада и за счет трансмиссионной теплоты, передаваемой наружной стеной со стороны самого помещения за счет теплопередачи. Нагретый наружный воздух проходит через отверстия приточного элемента 3, где также нагревается трансмиссионной теплотой внутреннего воздуха. Поступая в помещение, наружный приточный воздух смешивается с внутренним воздухом. Отработанный воздух удаляется через вентиляционную решетку 4.

Таким образом, навесная конструкция выполняет две задачи: играет роль аккумулирующего теплообменника и защищает материалы наружного ограждения от негативных влияний окружающей среды. Данная схема применима не только для одноэтажных зданий, но также для многоэтажного строительства. В этом случае навесной светопрозрачный фасад выполняется цельным и наружный приточный воздух, проходя всю высоту конструкции, нагревается до более высоких температур.

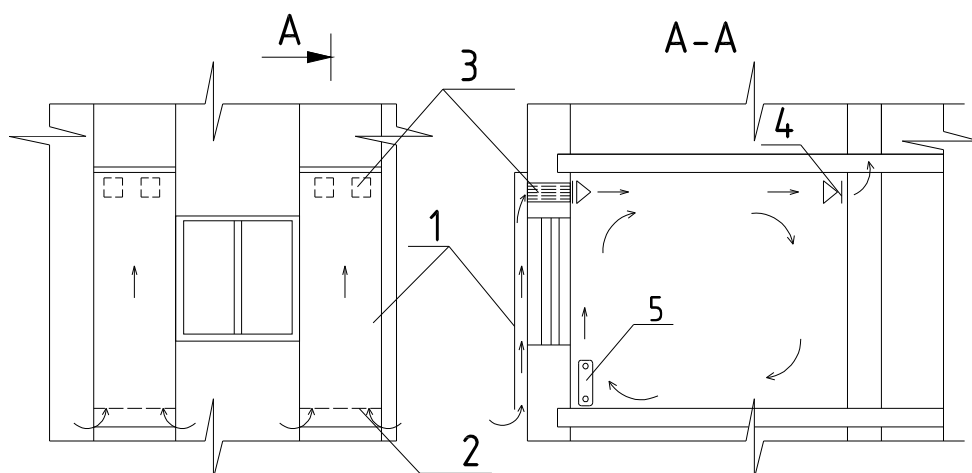


Рисунок 2. – Устройство фасада здания с рекуперативными приточными вентиляционными блоками: 1- навесной фасад; 2 – щелевые зазоры; 3 - вентиляционное приточное устройство типа РПВЭ; 4 – вытяжная решетка; 5- отопительный прибор

Циркуляция воздуха по такой схеме возникает в связи с разряжением внутри помещения за счет работы вытяжной системы вентиляции. Для обеспечения необходимого количества наружного приточного воздуха, поступающего в помещение, учитываются геометрические и климатологические параметры. Устойчивый воздухообмен рассчитывается путем аэродинамического расчета с последующим подбором типоразмера приточного блока.

Более детальная схема осуществления организованной вентиляции в помещениях зданий с навесными светопрозрачными фасадами представлена на рис. 3.

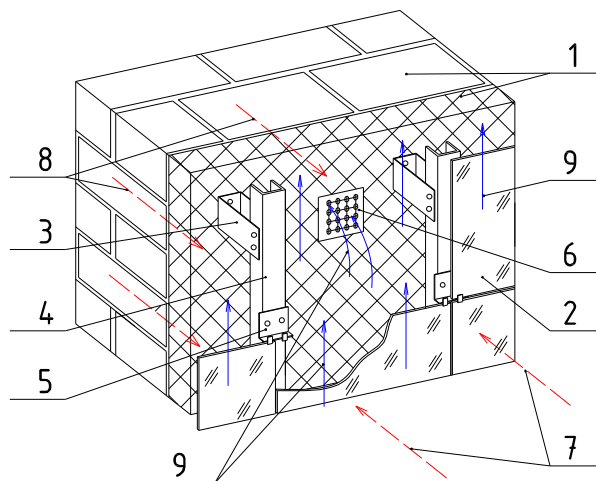


Рисунок 3. – Схема конструкции фасада здания с рекуперативными приточными вентиляционными блоками, тепловых и воздушных потоков в конструкции:

1 – кирпичная кладка со слоем утеплителя; 2 – светопрозрачный материал; 3 – несущий кронштейн; 4 – вертикальный профиль; 5 – кляммер; 6 – вентиляционное приточное устройство; 7 – тепловой поток солнечной радиации; 8 – трансмиссионный тепловой поток из помещения; 9 – воздушный поток наружного приточного воздуха.

Преимущества такой схемы организации естественного воздухообмена заключаются в отсутствии необходимости установки дополнительных устройств, т.к. вентиляционные блоки и навесной фасад монтируются на стадии строительства, при этом сохраняется эстетический вид здания.

Таким образом, применение такой конструкции позволяет сохранить оптимальный микроклимат в помещениях, обеспечивает подачу свежего наружного воздуха, не увеличивает уровень шума в помещениях как при открытии окон, не затрачивает дополнительные энергоресурсы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха = Ацяпленне, вентыляцыя і кандыцыяніраванне паветра: СНБ 4.02.01-03. – Введ. 30.12.2003 (с отменой на территории РБ СНиП 2.04.05-91). – Минск : Минскстройархитектура, 2004. 78 с.
2. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования = Будаўнічая цеплатэхніка. Будаўнічыя нормы праектавання : ТКП 45-2.04-43-2006. – Введ. 29.12.2006 (с отменой на территории РБ СНБ 2.04.01-97). – Минск : Минскстройархитектура, 2006. 36 с.
3. Жилые здания = Жылыя будынкі. СНБ 3.02.04-03. – Введ. 16.10.2003 (с отменой на территории РБ СНиП 2.08.01-89). – Минск : Минскстройархитектура, 2003. – 25 с.
8. Липко В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2 т. / В.И. Липко. – Т. 2. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 246 с.



ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОВОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ  
ГАЗИФИЦИРОВАННЫХ КУХОНЬ  
С УНИВЕРСАЛЬНЫМИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ БЫТОВЫМИ ГАЗОВЫМИ ПЛИТАМИ  
КОНСТРУКЦИИ ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

В.И. Липко, А.С. Ланезо

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: kafedratgsv@mail.ru

*Представлены результаты исследований вентиляции газифицированных кухонь, предназначенные для создания воздухообменного процесса внутри жилых зданий с функцией подогрева приточного вентиляционного воздуха с использованием теплоты уходящих газов. Проанализированы и обобщены результаты полученных данных теоретических исследований по математическому моделированию тепломассообменных процессов устройства тепловой вентиляции газифицированных кухонь и данных, полученных при проведении экспериментальных исследований для оценки эффективности утилизации тепловых выбросов от бытовой газовой плиты для предварительного подогрева приточного вентиляционного воздуха.*

*Ключевые слова: микроклимат, энергоресурсосбережение, воздухообеспечение, газоснабжение, теплоснабжение, рекуперация, утилизация, модернизация, инновации.*

ENERGY-EFFICIENCY EFFICIENT SYSTEM OF THERMAL VENTILATION  
OF GASIFICATED KITCHEN  
WITH UNIVERSAL MULTIFUNCTIONAL HOUSEHOLD GAS PLATES  
OF STRUCTURE OF POLOTSKOY STATE UNIVERSITY

V. Lipko, A. Lapezo

Polotsk State University, Belarus

email: kafedratgsv@mail.ru

*The results of studies of ventilation of gasified kitchens intended for the creation of an air exchange process inside residential buildings with the function of heating the fresh air ventilation with the use of the heat of the exhaust gases are presented. The results of the obtained theoretical research data on the mathematical modeling of heat and mass exchange processes of the device for thermal ventilation of gasified kitchens and the data obtained during the pilot studies for estimating the efficiency of utilization of thermal emissions from a household gas cooker for preliminary heating of the fresh air ventilation air are analyzed and summarized.*

*Keywords: microclimate, energy and resource saving, air supply, gas supply, heat supply, recuperation, utilization, modernization, innovations.*

**Введение.** Несовершенство технологии использования топливно-энергетических ресурсов в градостроительной отрасли и коммунально-бытовом секторе экономики, потребляющих более трети всех видов твердого, жидкого и газообразного топлива и электроэнергии, является обременительным для всего народного-хозяйственного комплекса Респуб-

лики Беларусь, импортирующей большую их часть, что значительно повышает энергоёмкость валового национального продукта и существенно снижает конкурентоспособность производимой продукции, в связи с чем дальнейшее совершенствование инженерных систем теплогазоснабжения и воздухообмена зданий с наружными ограждениями повышенной теплозащиты и герметичности, направляемых на энергоресурсосбережение в условиях комфортного проживания, являются одним из важнейших направлений государственных программ научных исследований Республики Беларусь.

**Основная часть.** Для обеспечения комфортных условий проживания, отвечающих современным санитарно-гигиеническим требованиям к качеству воздушной среды внутри отапливаемых и вентилируемых помещений, необходим комплексный подход к решению сложнейших научно-технических проблем, таких как:

- обеспечение нормативного воздухообмена с естественной вентиляцией за счет инфильтрации в условиях практически полной герметизации наружных ограждающих конструкций;
- улучшения качества микроклимата, снижения загазованности и переувлажнения в условиях открыто сжигаемого природного и сжиженного газа с выделением вредных веществ непосредственно внутрь жилых помещений;
- перерасход газообразного топлива из-за несовершенства конструктивно-технологического исполнения бытовых газовых плит;
- отсутствие использования теплоты продуктов сжигания газа бытовых газовых плит в теплоутилизационных устройствах перед выбросом в атмосферу для предварительного подогрева приточного вентиляционного воздуха, снижающего нагрузку на систему отопления от внешних энергоисточников.

Для успешной реализации всех этих проблем предлагается к внедрению инновационная разработка Полоцкого государственного университета многофункциональной бытовой газовой плиты (рис. 1) с широкими экологически безопасными энергоресурсоэффективными возможностями её использования, подтверждёнными патентами Республики Беларусь [1, 2].

На основании использования многофункциональных бытовых газовых плит конструкции Полоцкого государственного университета разработано устройство тепловой вентиляции газифицированных кухонь предназначенное для создания воздухообменного процесса внутри жилых зданий с функцией подогрева приточного вентиляционного воздуха, изображенной схематично на рисунке 2 и состоящей из воздухозаборной решетки 1, воздушного фильтра 2, приточного вентиляционного теплоизолированного воздуховода 3, входного патрубка 4, клинообразного воздухораспределителя 5 с кольцевыми отверстиями 6 со стороны теплообменной камеры 7 кожухотрубного теплообменника 8, клинообразного воздухоборника 9 с кольцевыми отверстиями 10 со стороны теплообменной камеры 7, приточного патрубка 11 и регулируемой жалюзийной решетки 12 образующих нагревательный контур кожухотрубного теплообменника 8, теплообменных трубок 15, расположенных в теплообменной камере 7 и соединяющих приемную камеру 14 с верхним клинообразным воздухоборником 16, присоединенным через выходной патрубок 17 к вытяжной системе вентиляции здания 18.

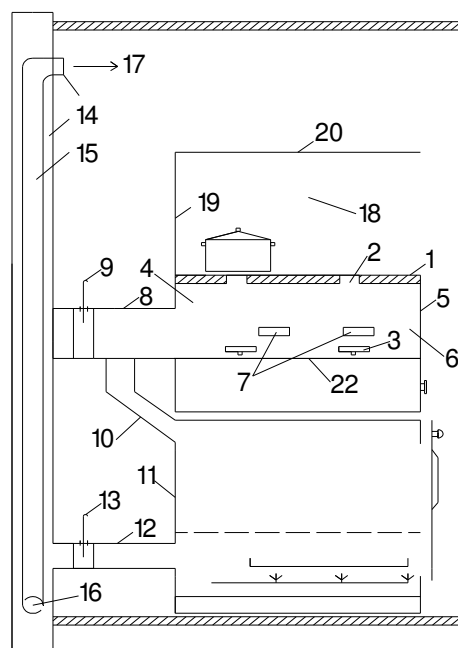


Рисунок 1. –Бытовая газовая плита:

1 – жарочная плита; 2 – открывающиеся крышки; 3 – газовые горелки; 4 – камера сжигания; 5 – глухая стенка; 6 – боковые стенки; 7 – отверстия для поступления воздуха; 8 – верхний прямооточный клапан; 9 – регулирующий шибер; 10 – промежуточный клапан; 11 – духовой шкаф; 12 – нижний вытяжной канал; 13 – регулирующий шибер; 14 – газоотводный канал; 15 – трубчатый теплообменник; 16 – воздухозаборная трубка; 17 – выходной патрубок; 18 – шкафное аспирационное укрытие; 19 – задняя стенка шкафного аспирационного укрытия; 20 – верхняя часть шкафного аспирационного укрытия; 21 – боковые стенки шкафного аспирационного укрытия; 22 – подгорелочный лист

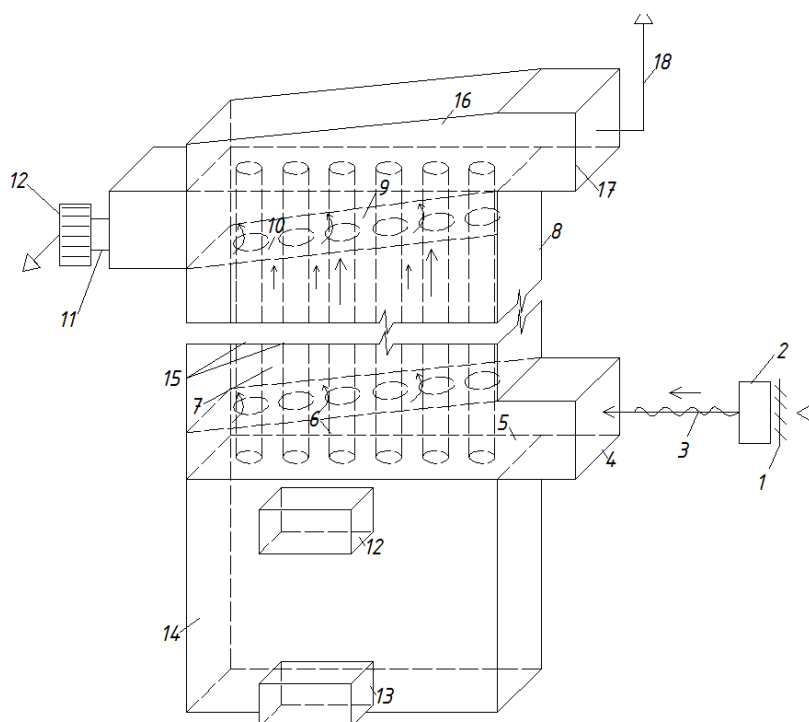


Рисунок 2. – Схема тепловой вентиляции газифицированных кухонь

Кожухотрубный теплообменник 8 габаритами 0,5 x 0,1 x 2,5 (рис. 3) устанавливается в нише капитальной стены помещения кухни за универсальной бытовой газовой плиты [1, 2] и не загромождает пространство кухни, а замена воздушного фильтра 2 выполняется через открывающееся кухонное окно.

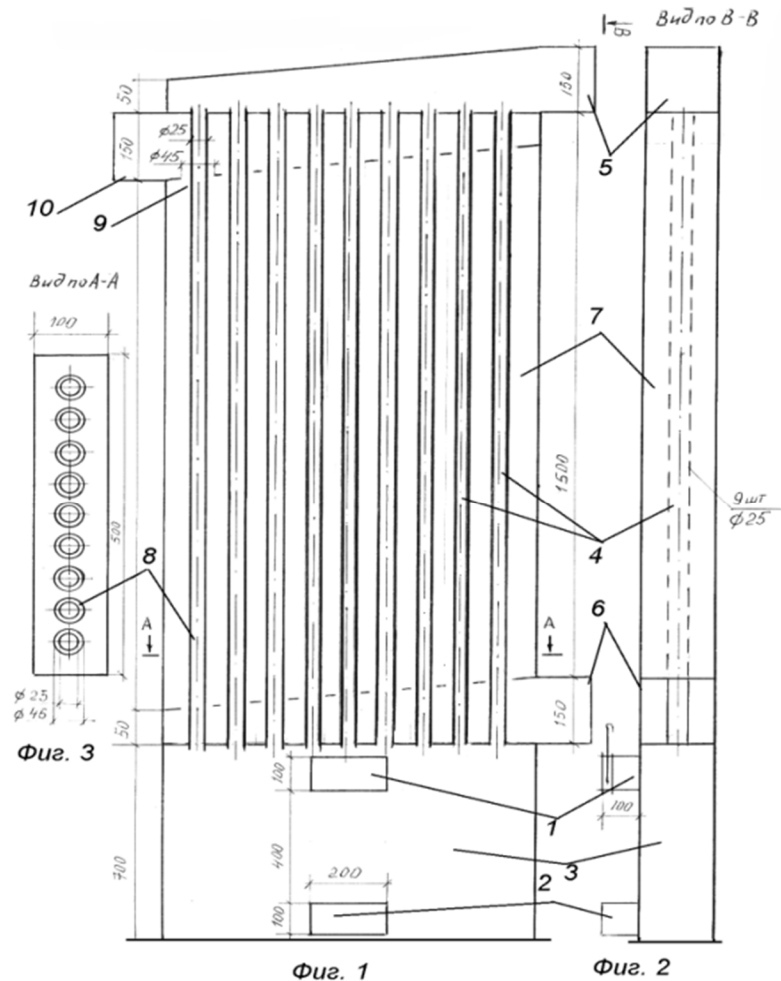


Рисунок 3. – Рекуперативный теплоутилизатор универсальной бытовой газовой плиты

Технологически принцип работы устройства тепловой вентиляции газифицированных кухонь заключается в том, что под действием работы системы вытяжной вентиляции здания 18 с наружными ограждениями повышенной теплозащиты и герметичности продукты сжигания газа из универсальной бытовой газовой плиты [1, 2] с температурой  $t_r > 100^\circ\text{C}$  через верхний 12 или нижний 13 (см. рис. 2) присоединительные патрубки поступают в приемную камеру 14 кожухотрубного рекуперативного теплообменника 8 и движутся по теплообменным трубкам 15 снизу вверх по теплообменной камере 7, передавая при этом через контактные наружные поверхности теплообменных трубок 15 теплоту греющих продуктов сжигания газа холодному наружному приточному воздуху, который также движется снизу вверх в межтрубном пространстве теплообменной камеры 7, а затем через верхний клинообразный воздухоотборник 16, выходной патрубок 17 и вытяжную систему 18, вентиляции здания выбрасывается в атмосферу, формируя таким образом греющий контур кожухотрубного рекуперативного теплообменника 8, а в нагреваемом контуре наружный воздух заходит через воздухозаборную решетку 1, воздушный фильтр 2, приточный теплоизолированный возду-

ховод 3, входной патрубок 4, клинообразный воздухораспределитель 5 с кольцевыми отверстиями 6 теплообменную камеру 7, из которой через кольцевые отверстия 10, клинообразный воздухосорбник 9, приточный патрубок 11 и регулирующую жалюзийную решетку 12 поступает в помещение газифицированной кухни в предварительно подогретом состоянии, снижая при этом тепловую нагрузку на систему отопления здания с функцией энергосбережения теплоснабжения от внешних энергоисточников.

При рассмотрении тепломассообменных процессов, протекающих в устройстве тепловой вентиляции газифицированных кухонь на основе теории теплотехники в прямоточном газовоздушном рекуперативном теплообменнике изменения температур теплообменивающихся сред осуществляется по графику, представленному на рисунке 4, в котором изменение температур теплоносителей при их движении вдоль поверхности теплообмена происходит нелинейно.

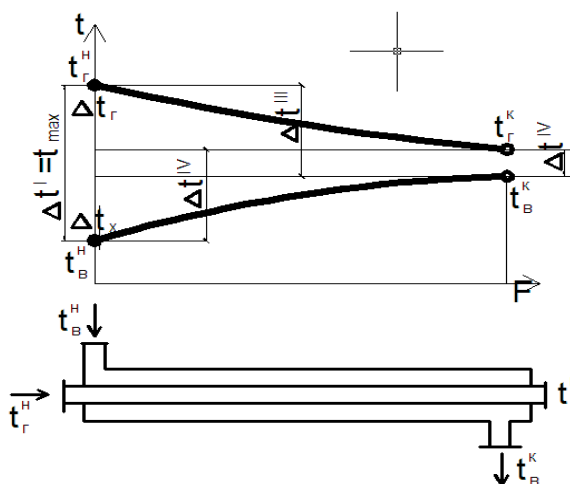


Рисунок 4. – График изменения температур теплообменивающихся сред в прямоточном газовоздушном рекуперативном теплообменнике

Учитывая это обстоятельство, средняя разность температур  $\Delta t_{cp}$ , определяется по логарифмическому уравнению

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}, \quad (1)$$

где  $\Delta t_6$  – большая разность температур греющего и нагреваемого теплоносителей, °С;  
 $\Delta t_m$  – меньшая разность температур греющего и нагреваемого теплоносителей, °С.

Общее количество теплоты, передаваемой от нагретых газов через стенку  $F$  нагреваемому воздуху определяется из выражения

$$Q = k \cdot F, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>°С;  
 $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплопередачи  $k$  через стенку газохода определится из выражения

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_H}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент тепловосприимчивости от греющего теплоносителя к внутренней поверхности стенки газохода, Вт/м<sup>2</sup>°С;

$\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенки газохода нагреваемому теплоносителю, Вт/м<sup>2</sup>°С;

$\delta$  – толщина стенки газохода, м;

$\lambda$  – теплопроводность материала стенки газохода, Вт/м °С.

$$\alpha_{\text{н}} = 11,6 + 7 \cdot \sqrt{V_{\text{вв}}}, \quad (4)$$

где  $V_{\text{вв}}$  – скорость нагреваемого вентиляционного воздуха при его движении внутри теплообменника, м/с.

Поверхность теплопередачи через стенку газохода определится из выражения

$$F_{\text{пг}} = \pi \cdot d_{\text{н}} \cdot l, \quad (5)$$

где  $d_{\text{н}}$  – наружный диаметр газохода, м;

$l$  – длина газохода в зоне контакта м.

Для оценки интенсивности теплообмена при утилизации теплоты горячих газов, локально удаляемых от бытовой газовой плиты через рекуперативный теплообменник устройства тепловой вентиляции газифицированных кухонь, используется безразмерный критерий коэффициент теории подобия критерий Нусельта, определяемый по формуле

$$Nu = 0,0207 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \theta, \quad (6)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса;

$Pr$  – критерий Прандтля;

$\theta = 1 + 2 \cdot d_{\text{вн}}/l$  – поправочный коэффициент;

$d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр газохода, м.

По значению критерия  $Nu$  определяется величина коэффициента  $\alpha$

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{d}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}. \quad (7)$$

Для определения закономерностей изменения теплопроизводительности теплообменника устройства тепловой вентиляции газифицированных кухонь зданий с повышенной теплозащитой и герметичностью наружных ограждений при переменных тепловых и аэродинамических режимах выполнены экспериментальные исследования.

Экспериментальная установка, представленная на рисунке 5, состоит из газовой плиты 1, теплообменника, включающего греющий газоход 4 круглого сечения, диаметром  $d_{\text{г}}$ , нагреватель воздуха квадратного сечения с входным 2 и выходным 7 патрубками.

Для фиксации температур греющего и нагреваемого теплоносителей, а также температур поверхностей установлены термометры стеклянные 3, 5, 8 и контактные 9, 10, 11 и 12.

Для фиксации скорости движения и расходов греющего и нагреваемого воздушных теплоносителей на установке используются крыльчатые анемометры 13, 14. Для определения расхода сжигаемого газа в установке использован газовый бытовой счетчик 15, а для фиксации давления газа – микроманометр 16.

При розжиге газа от горелки 6 продукты сгорания газа вместе с эжектируемым воздухом образуют смесь греющих газов, направляемую в газоход 4 конвективным потоком, имеющим начальную температуру  $t_{\text{пг}}^{\text{н}}$  и температуру на выходе  $t_{\text{пг}}^{\text{к}}$ , фиксируемую термометром 5.

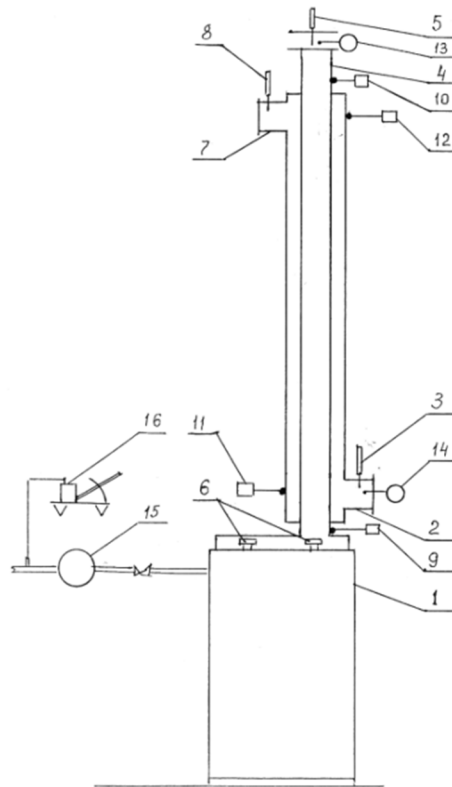


Рисунок 5. – Схема экспериментального стенда для исследования теплообменника газовой плиты

Средняя температура теплоотдающей поверхности  $t_{9,10}^{cp}$  газохода 4 измеряется контактными термометрами 9 и 10 и определяется из выражения

$$t_{9,10}^{cp} = \frac{t_9^H + t_{10}^K}{2}, \quad (8)$$

где  $t_{9,10}^{cp}$  – соответственно начальная температура поверхности газохода и конечная, °С.

Количество теплоты  $Q_{г.сп.}$ , затрачиваемой на нагрев вентиляционного воздуха с поверхности газохода, определится из выражения

$$Q_{г.сп.} = K_{г.} \cdot F_{п.г.} \cdot (t_{9,10}^{cp} - t_{8,14}^{cp}), \quad (9)$$

где  $K_{г.}$  – коэффициент теплоотдачи через стенку газохода 4, Вт/м<sup>2</sup>°С;

$F_{п.г.}$  – теплоотдающая поверхность газохода, м<sup>2</sup>;

$t_{9,10}^{cp}$  – средняя температура газовой смеси в газоходе, °С;

$t_{8,14}^{cp}$  – средняя температура нагреваемого вентиляционного воздуха, °С.

Теплоотдающая поверхность газохода определяется из выражения

$$F_{п.г.} = \pi \cdot d_{г.} \cdot l_{т.}, \quad (10)$$

где  $d_{г.}$  – диаметр газохода, м;

$l_{т.}$  – длина теплообменника, м.

При установившемся режиме количество теплоты  $Q_{г.сп.}$ , передаваемой от первичного теплоносителя (газовой смеси) через стенку газохода, равно количеству теплоты, переходящей по теплообменнику к нагреваемому вентиляционному воздуху, т.е.

$$Q_{г.с.п} = Q_{пг}. \quad (11)$$

Величина  $Q_{пг}$  численно равна количеству теплоты, отдаваемой с поверхности газохода, т.е.

$$Q_{пг} = \alpha_n \cdot F_{пг} \cdot (t_{гс}^{cp} - t_{вв}^{cp}), \quad (12)$$

где все входящие величины известны и определяются расчетом или экспериментально.

Вычислив значение  $Q_{пг}$  из выражения (12) с учетом выражения (11) решим уравнение (9) относительно величины  $t_{гс}^k$

$$t_{гс}^{cp} = t_{вв}^{cp} + \frac{Q_{г.с.п}}{k \cdot F_{пг}}, \quad (13)$$

а величину начальной температуры газовой смеси  $t_{гс}^H$  определим из выражения

$$t_{гс}^H = 2 \cdot t_{гс}^{cp} - t_{гс}^k. \quad (14)$$

Значения критерия Re для определения величины  $\alpha_n$  вычисляются расчетным путем

$$Re = \frac{V_{гс} \cdot d_r}{\nu}, \quad (15)$$

где  $d_r$  – диаметр газохода 4, м;

$V_{гс}$  – скорость движения газовой смеси по газоходу, замеряемая экспериментально анемометром 13 (см. рис. 5), м/с;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с (для средней температуры газовой смеси).

Данные экспериментальных исследований и результаты их обработки по вышеизложенной методике представлены в таблице.

Таблица. – Результаты исследования теплообменника

	$L_1, \text{ м}^3/\text{с}$	$V_{вв}$	$\alpha_n$	$Q_{пг}, \text{ Вт}$	$\Delta t_{вх}$	$\Delta t_{вых}$	$\ln \frac{\Delta t_{вх}}{\Delta t_{вых}}$	$\frac{\Delta t_{вх}}{\Delta t_{вых}}$	$t_{3,8}^{cp}$	$\Delta t_{cp} = t_{9,10}^{cp} - t_{3,8}^{cp}$	$K$
1	0,0067	0,22	14,9	82,4	8,3	5,7	0,375	1,456	27,90	7,00	15,07
2	0,0071	0,24	15,0	67,5	10,4	1,0	2,340	10,400	31,50	5,70	21,25
3	0,006	0,20	14,7	58,1	9,0	1,0	2,200	9,000	32,50	5,00	20,20
4	0,0074	0,25	15,1	75,2	12,0	0,6	3,000	20,000	35,00	6,30	25,05
5	0,008	0,27	15,2	108,7	15,0	3,0	1,610	5,000	36,25	9,05	18,50
6	0,0085	0,28	15,3	111,8	16,5	2,0	2,110	8,250	37,25	9,25	20,60
7	0,0087	0,29	15,4	149,0	20,0	4,5	1,490	4,440	38,75	12,25	18,14

**Заключение.** Анализируя и обобщая результаты полученных данных теоретических исследований по математическому моделированию тепломассообменных процессов устройства тепловой вентиляции газифицированных кухонь и данными, полученными при проведении экспериментальных исследований для оценки эффективности утилизаций тепловых выбросов от бытовой газовой плиты [1, 2] для предварительного подогрева приточного вентиляционного воздуха, можно сделать выводы и общее заключение.



В целях энергоресурсосбережения и снижения отопительной нагрузки на системы обогрева зданий в отопительный период, улучшения качества воздушной среды за счет локализации вредных выделений при сжигании газообразного топлива в бытовых газовых плитах, обеспечения необходимого нормативного воздухообмена газифицированных кухонь и жилых помещений в условиях практически полной герметизации наружных ограждающих конструкций, снижения расхода газообразного топлива за счет конструктивных усовершенствований бытовой газовой плиты, осуществления социально-экономической и экологической, санитарно-гигиенической безопасности за счет комфортного проживания предлагается к реализации новационная разработка Полоцкого государственного университета, подтвержденная патентами и результатами выполненных теоретических и экспериментальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Газовая плита : пат. BY 4338 / В.И. Липко, С.В. Липко ; дата публ.: 03.01.2012.
2. Газовая плита : пат. BY 8117 / В.И. Липко ; дата публ.: 30.04.2012.
3. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий : в 2 т./ В.И. Липко. – Т. 2. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2004. – 212 с.
4. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий : в 2 т./ В.И. Липко. – Т. 2. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2004. – 392 с.

УДК 697.9

# НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ СНИЖЕНИЯ МЕТАЛЛО- И ЭНЕРГОЕМКОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ ЗДАНИЙ С НЕРАВНОМЕРНЫМ УТЕПЛЕНИЕМ НАРУЖНЫХ СТЕН ПРИ ВОЗДУШНОМ ОТОПЛЕНИИ

*В.И. Липко, С.В. Ланкович*

Полоцкий государственный университет, Беларусь  
email: kafedratgsv@mail.ru, s.lankovich@psu.by

*На основе действующей нормативной базы показано построение методики расчёта систем воздушного отопления зданий повышенной теплозащиты и герметичности наружных ограждающих конструкций с выполнением теплотехнического расчёта.*

*Ключевые слова: воздушное отопление, теплопотери, теплопоступления, воздухообмен, наружное ограждение, сопротивление теплопередаче.*

## RESEARCH AND METHODOLOGICAL INNOVATIVE DESIGN REDUCING METAL AND ENERGY CONSUMPTION OF ENGINEERING SYSTEMS OF HEAT CONSUMPTION OF BUILDINGS WITH AN IRREGULAR WARMING OF EXTERNAL WALLS WITH AIR HEATING

*V. Lipko, S. Lankovich,*

Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus  
email: kafedratgsv@mail.ru, s.lankovich@psu.by

*Based on the functional of the statutory framework shows the development of methodology for calculation of air heating systems of buildings with advanced thermal protection and tightness of enclosing structures with the thermotechnical calculation.*

*Keywords: air heating, heat losses, heat input, air change, outer shell, heat-transfer resistance.*

Научные разработки в области эффективного домостроения позволяют осуществить безболезненный переход к более энергоэкономичным системам воздушного отопления зданий, совмещенного с активной вентиляцией, что продуктивно в условиях постоянного увеличения в градостроительной практике использования абсолютно непроницаемых для воздуха материалов, таких как бетон, стекло, металл, пластмассы, клеи, герметики, мастики, гидро- и пароизоляционные материалы, исключающие возможность использования технологии естественной вентиляции, основанной на инфильтрации наружного воздуха через неплотности наружных ограждающих конструкций.

Широко применяемые в настоящее время в домостроении водяные системы отопления должны компенсировать не только теплопотери зданий через наружные ограждения, но ещё в большей степени нагревать воздух, поступающий неорганизованным путём в отапливаемые помещения за счёт инфильтрации, что значительно увеличивает металлоёмкость и энергопотребление в процессе строительства и эксплуатации зданий в условиях длительного, свыше 200 суток отопительного периода для Республики Беларусь, при том, что и металл, и энергоресурсы импортного происхождения влияют на стоимость единицы национального валового продукта.

В соответствии с действующей нормативной базой [1, 2, 3] для систем водяного отопления суммарные теплопотери здания  $Q$ , Вт определяются по формуле

$$Q_{\Sigma} = Q_m + Q_i - Q_o, \quad (1)$$

где  $Q_m$  – трансмиссионные основные и добавочные теплопотери наружных ограждающих конструкций здания, Вт;

$Q_i$  – расход теплоты на нагрев наружного воздуха за счёт инфильтрации, Вт;

$Q_{\delta}$  – бытовые теплопоступления жилых помещений и кухонь, Вт;

Трансмиссионные основные и добавочные теплопотери наружных ограждающих конструкций здания определяются по формуле

$$Q_m = Q_{HC} + Q_{OK} + Q_{ПОЛ} + Q_{ПОКР}, \quad (2)$$

где  $Q_{HC} = \frac{F_{HC}}{R_{HC}}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot (1 + \sum \beta) \cdot n$  – трансмиссионные основные и добавочные теплопотери через наружные стены, Вт;

$Q_{OK} = \frac{F_{OK}}{R_{OK}}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot (1 + \sum \beta) \cdot n$  – трансмиссионные основные и добавочные теплопотери через окна, Вт;

$Q_{ПОЛ} = \frac{F_{ПОЛ}}{R_{ПОЛ}}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot n$  – трансмиссионные теплопотери через полы нижнего этажа или перекрытие над подвалом неотапливаемого подвала, Вт;

$Q_{ПОКР} = \frac{F_{ПОКР}}{R_{ПОКР}}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot n$  – трансмиссионные теплопотери через верхнее покрытие или перекрытие верхнего этажа потолка, Вт;

$F_{HC}, F_{OK}, F_{ПОЛ}, F_{ПОКР}$  – расчётная площадь охлаждаемых поверхностей наружных ограждений: стен, окон, пола нижнего этажа и потолка верхнего этажа, м<sup>2</sup>;

$R_{HC}, R_{OK}, R_{ПОЛ}, R_{ПОКР}$  – термическое сопротивление теплопередаче наружных ограждений: стен, окон, пола нижнего этажа и потолка верхнего этажа, м<sup>2</sup>·°C/Вт;

$t_{\text{в}}, t_{\text{н}}$  – расчётные нормативные внутренняя и наружная температуры воздуха соответственно, °C;

$\beta$  – коэффициент процентного отношения добавочных теплопотерь;

$n$  – коэффициент учёта расположения наружного ограждения.

Расход теплоты на нагрев наружного воздуха за счёт инфильтрации, Вт, определяемый из выражения

$$Q_i = 0,28 \cdot L_{np} \cdot \rho_{\text{н}} \cdot c \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot K, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где  $L_{np} = 3 \cdot F_n$  – расход наружного воздуха, поступающего в жилые помещения и кухню за счёт инфильтрации, м<sup>3</sup>/ч;

$F_n = F_{\text{ж}} + F_{\text{к}}$  – расчётная площадь пола жилых помещений и кухни, м<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{н}} = \frac{353}{273 + t_{\text{н}}}$  – плотность наружного воздуха как функция от  $t_{\text{н}}$ , кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – теплоёмкость воздуха, кДж/кг;

$K$  – коэффициент учёта влияния встречного теплового потока в конструкциях наружных ограждений.

Бытовые теплопоступления согласно изменениям №4 [1] определяются по формуле

$$Q_{\delta} = Q_{\text{н}} \cdot (1 - \eta), \text{ Вт}, \quad (4)$$

где  $Q_h = 9 \text{ Вт/м}^2$  – бытовые тепlopоступления для жилых зданий;  
 $\eta$  – коэффициент, зависящий от способа регулирования системы отопления здания.  
 Приведенное сопротивление теплопередаче  $R_0$  теплотехнически ограждающей конструкции с последовательно расположенными однородными слоями [2, табл. 5.9 и 5.10]:

$$R_0 = r \cdot \left( \frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_n} \right), \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \quad (5)$$

где  $r$  – расчетный коэффициент, учитывающий нарушения теплотехнической однородности ограждающей конструкции (коэффициент теплотехнической однородности);

$\alpha_e$  – коэффициент теплоотдачи, принимается, согласно [1, табл. 5.4];

$\delta_i$  – толщина слоя, м;

$\lambda_i$  – расчетный коэффициент теплопроводности материала слоя, многослойной наружной конструкции [2, табл. 4.2];

$\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, ограждающей конструкции для зимних условий,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ;

Для расчёта толщины утеплителя  $\delta_{ут}$  при равномерном утеплении ограждающих конструкций рассмотрим бесчердачное здание с плоской кровлей и неотапливаемым подвалом, представленным схематично на рисунке 1, планировка квартир представлена на рисунке 2, а конструкции ограждений на рисунках 2–5.

Географический район строительства – г. Минск, ориентация здания показана на схеме.

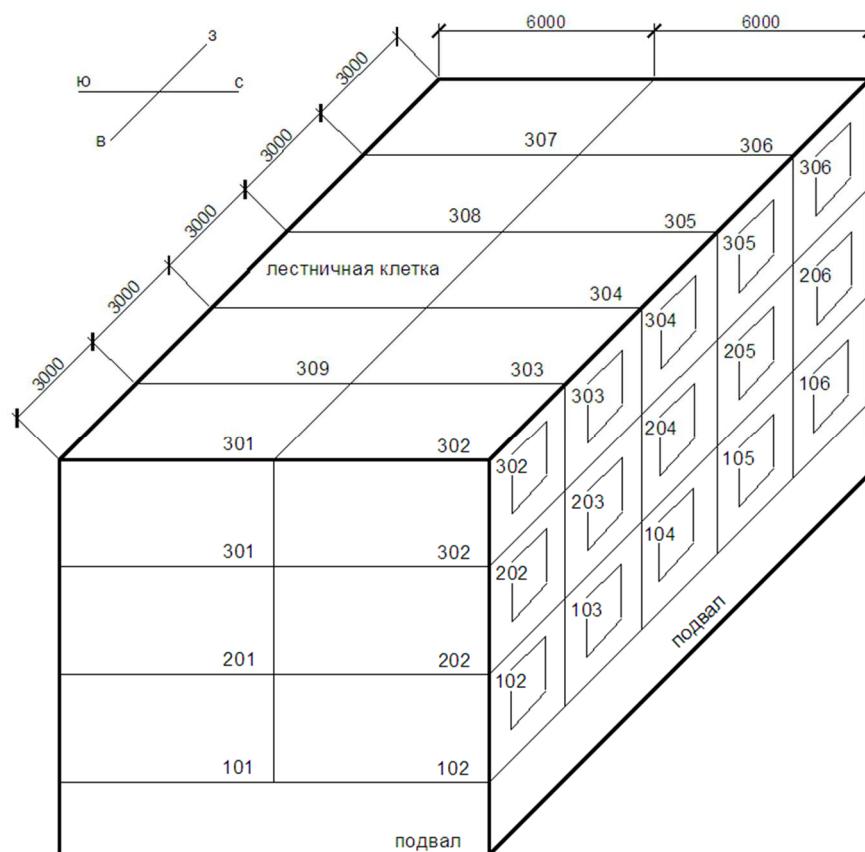


Рисунок 1. – Схема расположения жилых помещений и лестничной клетки в объёме здания

Конструктивно стеновая панель (рис. 2) состоит из 5-ти слоев.

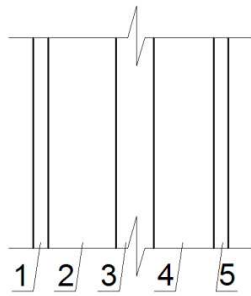


Рисунок 2. – Конструкция наружного ограждения

1 – слой наружной цементно-песчаной штукатурки

$$\delta_1 = 0,02 \text{ м}, \lambda_1 = 0,93 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}, s_1 = 11,09 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$$

2 – слой железобетона  $\delta_2 = 0,09 \text{ м}, \lambda_2 = 2,04 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}, s_2 = 19,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$

3 – слой утеплителя из плит пенополистирольных

$$\delta_3 = 0,2 \text{ м}, \lambda_3 = 0,05 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}, s_3 = 0,48 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$$

4 – слой железобетона  $\delta_4 = 0,06 \text{ м}, \lambda_4 = 2,04 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}, s_4 = 19,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$

5 – слой внутренней известково-песчаной штукатурки

$$\delta_5 = 0,02 \text{ м}, \lambda_5 = 0,81 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}, s_5 = 9,76 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Запишем формулу (4) в развёрнутом виде для конструкции принятой к рассмотрению стеновой панели:

$$R_m = r \left( \frac{1}{\alpha_e} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_n} \right); \quad 6)$$

$$R_m = 0,8 \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,93} + \frac{0,09}{2,04} + \frac{0,2}{0,05} + \frac{0,06}{2,04} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{1}{23} \right) = 3,4 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}.$$

Нормативное сопротивление теплопередаче наружной стены здания, согласно [2, табл. 5.1] принимается равным  $R_{m \text{ норм}} = 3,2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$ .

Таким образом, на основании выполненного теплотехнического расчета в соответствии с действующей нормативной базой для здания, принятого к рассмотрению, толщина эффективного слоя утепления стеновых панелей всех помещений будет одинаковой и равна 0,2 м.

Для определения величины расчетной наружной температуры  $t_n$  определим значение величины тепловой инерции принятой к рассмотрению стеновой панели согласно [1, п. 5.3] по формуле:

$$D = \sum R_i \cdot s_i = R_1 \cdot s_1 + R_2 \cdot s_2 + R_3 \cdot s_3 + R_4 \cdot s_4 + R_5 \cdot s_5 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} \cdot s_1 + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \cdot s_2 + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \cdot s_3 + \frac{\delta_4}{\lambda_4} \cdot s_4 + \frac{\delta_5}{\lambda_5} \cdot s_5$$

$$D = \frac{0,02}{0,93} \cdot 11,09 + \frac{0,09}{2,04} \cdot 19,7 + \frac{0,2}{0,05} \cdot 0,48 + \frac{0,06}{2,04} \cdot 19,7 + \frac{0,02}{0,81} \cdot 9,76 =$$

$$= 0,238 + 0,869 + 1,92 + 0,579 + 0,241 = 3,847 < 4$$

Применяем в расчетах в качестве температуры наружного воздуха среднюю температуру наиболее холодных суток обеспеченностью 0,92  $t_{ext} = -28^\circ\text{C}$  для г. Минска.

Конструктивно покрытие над неотапливаемым подвалом (рис. 3) состоит из 4-х слоев.

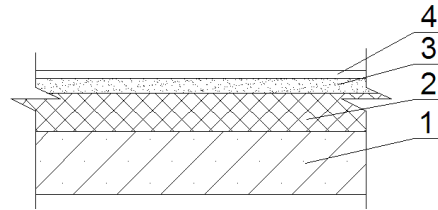


Рисунок 3. – Конструкция покрытия над неотапливаемым подвалом

1 – железобетонная плита

$$\delta_1 = 0,22\text{м}, \lambda_1 = 2,04\text{Вт} / \text{м} \cdot ^\circ\text{C}, s_1 = 19,7\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$$

2 – слой утеплителя из плит пенополистирольных

$$\delta_2 = 0,1\text{м}, \lambda_2 = 0,05\text{Вт} / \text{м} \cdot ^\circ\text{C}, s_2 = 0,48\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$$

3 – слой цементно-песчаного раствора

$$\delta_3 = 0,015\text{м}, \lambda_3 = 0,81\text{Вт} / \text{м} \cdot ^\circ\text{C}, s_3 = 9,76\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$$

4 – слой линолеума многослойного

$$\delta_4 = 0,05\text{м}, \lambda_4 = 0,38\text{Вт} / \text{м} \cdot ^\circ\text{C}, s_4 = 4,6\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Для конструкции покрытия над неотапливаемым подвалом сопротивление теплопередачи определяется по формуле (6):

$$R_m = 0,9 \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,22}{2,04} + \frac{0,1}{0,05} + \frac{0,015}{0,81} + \frac{0,05}{0,38} + \frac{1}{23} \right) = 2,2\text{м}^2\text{C} / \text{Вт}.$$

Конструктивно чердачное покрытие (рис. 4) состоит из 5-ти слоев.

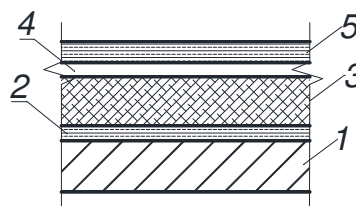


Рисунок 4. – Конструкция чердачного покрытия

1 – железобетонная плита

$$\delta_1 = 0,22\text{м}, \lambda_1 = 2,04\text{Вт} / \text{м} \cdot ^\circ\text{C}, s_1 = 19,7\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$$

2 – слой рубероида

$$\delta_2 = 0,06\text{м}, \lambda_2 = 0,17\text{Вт} / \text{м} \cdot ^\circ\text{C}, s_2 = 3,53\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$$

3 – слой утеплителя из плит пенополистирольных

$$\delta_2 = 0,25\text{м}, \lambda_2 = 0,05\text{Вт} / \text{м} \cdot ^\circ\text{C}, s_2 = 0,48\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$$

4 – слой цементно-песчаной стяжки

$$\delta_4 = 0,7\text{м}, \lambda_4 = 0,93\text{Вт} / \text{м} \cdot ^\circ\text{C}, s_4 = 11,09\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C};$$

5 – слой рубероида (в 5 слоёв)  $\delta_5 = 0,3 \text{ м}$ ,  $\lambda_5 = 0,17 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $s_5 = 3,53 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Для конструкции чердачного покрытия сопротивление теплопередачи определим по формуле (6):

$$R_m = 0,9 \left( \frac{1}{8,7} + \frac{0,22}{2,04} + \frac{0,06}{0,17} + \frac{0,2}{0,05} + \frac{0,7}{0,93} + \frac{0,3}{0,17} + \frac{1}{12} \right) = 6,5 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}.$$

Нормативное сопротивление теплопередаче чердачного покрытия здания, согласно [2, табл. 5.1] принимается равным  $R_{m \text{ норм}} = 6,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$ .

Для зданий с системами водяного отопления при естественной вентиляции путём неорганизованного притока наружного воздуха за счёт инфильтрации его нагревание непосредственного в помещении от расчётной температуры наружного воздуха  $t_n$  до температуры внутреннего воздуха  $t_e$  осуществляется системой отопления.

Для систем воздушного отопления зданий совмещённого с активной вентиляцией, в строгом соответствии с тепловым и воздушным балансом, необходимо равенство приточного и удаляемого воздуха для каждого помещения в объёме нормативного воздухообмена и полной компенсацией сбалансированных теплотерь и тепlopоступлений, что обеспечивается за счёт перегрева централизованно обработанного приточного вентиляционного воздуха и подачи его в жилые помещения и кухню с температурой  $t_{np}$

$$t_{np} = t_e + \Delta t, \quad (8)$$

где  $\Delta t = \frac{Q_\Sigma}{0,28 \cdot \rho \cdot c \cdot L_{np}}$  – перегрев приточного воздуха для компенсации суммарных теплотерь и тепlopоступлений,  $^\circ\text{C}$ .

Перепишем выражение для  $\Delta t$  в развёрнутом виде с подстановкой нормативных значений входящих величин и после преобразований получим

$$\Delta t = \frac{Q_\Sigma}{0,28 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 3 \cdot F_n} = \frac{Q_\Sigma}{1,176 \cdot F_n}, \quad (9)$$

Разложив  $Q_\Sigma$  на составляющие, получим

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{Q_\Sigma}{1,176 \cdot F_n} = \frac{Q_{HC}}{1,176 \cdot F_n} + \frac{Q_{OK}}{1,176 \cdot F_n} + \frac{Q_{ПОЛ}}{1,176 \cdot F_n} + \frac{Q_{ПОКР}}{1,176 \cdot F_n} + \frac{Q_i}{1,176 \cdot F_n} - \frac{Q_o}{1,176 \cdot F_n} = \\ &= \frac{F_{HC} \cdot (t_e - t_n) \cdot (1 + \Sigma \beta) \cdot n}{1,176 \cdot R_{HC} \cdot F_n} + \frac{F_{OK} \cdot (t_e - t_n) \cdot (1 + \Sigma \beta) \cdot n}{1,176 \cdot R_{OK} \cdot F_n} + \frac{F_{ПОЛ} \cdot (t_e - t_n) \cdot n}{1,176 \cdot R_{ПОЛ} \cdot F_n} + \\ &\quad \frac{F_{ПОКР} \cdot (t_e - t_n) \cdot n}{1,176 \cdot R_{ПОКР} \cdot F_n} + \frac{0,28 \cdot \rho \cdot c \cdot 3 \cdot F_n \cdot K}{1,176 \cdot F_n} - \frac{9 \cdot F_n \cdot (1 - 0,2)}{1,176 \cdot F_n} = \\ &= \frac{F_{HC} \cdot (19 + 28) \cdot 1,15 \cdot 1}{1,176 \cdot 3,4 \cdot F_n} + \frac{F_{OK} \cdot (19 + 28) \cdot 1,15 \cdot 1}{1,176 \cdot 1 \cdot F_n} + \frac{F_{ПОЛ} \cdot (19 + 28) \cdot 0,6}{1,176 \cdot 2,2 \cdot F_n} + \\ &\quad + \frac{F_{ПОКР} \cdot (19 + 28) \cdot 1}{1,176 \cdot 6,5 \cdot F_n} + \frac{0,28 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 3 \cdot F_n \cdot 0,7}{1,176 \cdot F_n} - \frac{9 \cdot F_n \cdot (1 - 0,2)}{1,176 \cdot F_n} = \\ &= \frac{13,5 \cdot F_{HC}}{F_n} + \frac{46 \cdot F_{OK}}{F_n} + \frac{10,9 \cdot F_{ПОЛ}}{F_n} + \frac{6,1 \cdot F_{ПОКР}}{F_n} + 0,7 - 6,1 = \\ &= \frac{(13,5 \cdot F_{HC} + 46 \cdot F_{OK} + 10,9 \cdot F_{ПОЛ} + 6,1 \cdot F_{ПОКР})}{F_n} - 5,4^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (10)$$

Приняв за среднее значение  $t_e = \frac{18+20}{2} = 19^\circ\text{C}$  в соответствии с формулой (10) температура приточного воздуха для систем воздушного отопления здания определится из выражения

$$\begin{aligned} t_{np} &= 19 + \frac{13,5 \cdot F_{HC} + 46 \cdot F_{OK} + 10,9 \cdot F_{ПОЛ} + 6,1 \cdot F_{ПОКР}}{F_n} - 5,4 = \\ &= 13,6 + \frac{13,5 \cdot F_{HC} + 46 \cdot F_{OK} + 10,9 \cdot F_{ПОЛ} + 6,1 \cdot F_{ПОКР}}{F_n}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, для любого здания по конструктивным размерам можно быстро и легко по формуле (11) определить температуру  $t_{np}$  приточного воздуха и суммарный расход теплоты на отопление и вентиляцию здания при воздушном отоплении по формуле

$$Q_{в.о.} = 0,28 \cdot L_{np} \cdot \rho_n \cdot c \cdot (t_{np} - t_n) \text{ Вт}. \quad (12)$$

Исследования в области создания энергоэффективных систем воздушного отопления в зданиях с наружными ограждающими конструкциями повышенной теплозащиты и герметичности свидетельствуют о том, что формированию комфортных параметров микроклимата в помещениях наиболее полно удовлетворяют системы воздушного отопления, совмещённые с активной вентиляцией [4].

Построение вышеизложенной методики расчёта температуры приточного воздуха  $t_{np}$  (11) и суммарного расхода тепловой энергии  $Q_{в.о.}$  (12) для систем воздушного отопления, совмещённого с активной вентиляцией, базируется на основных положениях теории аэродинамики и тепломассообмена и воздухообменов по нормативным параметрам и осреднением в пределах допустимых погрешностей.

Для систем воздушного отопления, совмещённых с активной вентиляцией, при которой в каждое вентилируемое помещение поступает тёплый воздух из единого приточного центра с одинаковой температурой  $t_{np}$  и в количестве, соответствующем нормативному воздухообмену с одновременной компенсацией всех теплопотерь без дополнительной установки кондиционеров-доводчиков очень важным является разработка неоднородной системы утепления наружных стен каждого отапливаемого помещения с различной толщиной эффективного слоя утеплителя с целью выравнивания удельных теплопотерь, что ложится в основу дальнейших научных исследований для минимизации энергопотребления от внешних источников за счёт более широкого использования вторичных и природных энергоресурсов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Отопление вентиляция и кондиционирование воздуха : СНБ 4.02.01-03. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2003.
2. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-2.04-43-2006 (02250). – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2007. – 32 с.
3. Жилые здания : СНБ 3.02.04-03. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2003.
4. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2 т. / В.И. Липко. – Т. 1. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 300 с.
5. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий : в 2 т. / В.И. Липко. – Т. 2. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 246 с.



6. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий : в 2 т. Т.1, Т.2 – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2004.
7. Технологический чердак здания : пат. 9618и Респ. Беларусь : МПК (2006.01) E04H1/02 / В.И. Липко, Е.С. Добросольцева, С.В. Липко, С.В. Ланкович ; дата публ.: 30.10.2013. /
8. Рекуперативное устройство приточно-вытяжной вентиляции здания : пат. № 8381 Респ. Беларусь : МПК F24D7/00 / В.И. Липко, С.В. Липко ; дата публ.: 04.03.2012.
9. Здание с утепляющей оболочкой : пат. 008576 В1 Евр. пат. ведомство : МПК E04B1/76 (2006.01), E04H (2006.01) / Л.Н. Данилевский, В.М. Пилипенко, В.А. Потерщук / дата публ. 09.06.2007.
10. Отопительно-вентиляционная система здания : пат. 1134 Респ. Беларусь : МПК (2003) F24D7/00 / В.И. Липко, В.А. Борванов ; дата публ.: 01.08.2003.
11. Ланкович, С.В. Энергоресурсоэффективное устройство тепловой вентиляции здания с технологическим чердаком с использованием вторичных и природных энергоисточников / С.В. Ланкович, В.И. Липко // Устойчивое развитие: региональные аспекты : Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных, Брест, 20-21 апр. 2017 г. – Брест, 2017.
12. Широкова, О.Н. Экологически и экономически эффективные системы тепловоздухоснабжения индивидуально отапливаемых и активно вентилируемых малоэтажных зданий / О.Н. Широкова, В.И. Липко / Материалы докладов 50-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной году науки : в 2 т. – 2017. – С. 319–322.
13. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективные системы тепловоздухоснабжения жилых зданий повышенной теплозащиты / В.И. Липко, О.Н. Широкова, А.С. Лапезо // Новое в технике и технологии в текстильной и легкой промышленности : материалы докладов Междунар. науч.-техн. конф. / Витеб. гос. технол. ун-т. – 2015. – С. 285–287.
14. Липко, В.И. Теория исследования работы рекуперативных приточных вентиляционных элементов в инновационной технологии поддержания микроклимата герметизированных зданий / В.И. Липко, Н.В. Кундро // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. –Т. 1. – № 1. – С. 230–238.

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ЧЕРДАКАМИ  
С ЦЕЛЮ МИНИМИЗАЦИИ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ ОТ ВНЕШНИХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

*В.И. Липко, С.В. Ланкович*

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: kafedratgsv@mail.ru, s.lankovich@psu.by

В целях решения проблем энергоресурсосбережения в градостроительстве предлагается применение инновационной технологии модернизированных чердачных жилых зданий с использованием навесных вентилируемых светопрозрачных фасадных систем в сочетании с теплыми чердаками.

**Ключевые слова:** энергосбережение, рекуперация, модернизация, вторичные энергисточники, технологический чердак.

TECHNOLOGICAL IMPROVEMENTS  
TO ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS  
WITH TECHNOLOGICAL ATTICS TO MINIMIZE HEAT FROM EXTERNAL ENERGY

*V. Lipko, S. Lankovich*

Polotsk State University, Belarus

email: kafedratgsv@mail.ru, s.lankovich@psu.by

In order to solve the problems of energy saving in urban planning offers innovative technology modernized attic of residential buildings using the ventilated façade systems, translucent glass in conjunction with warm attics.

**Keywords:** energy saving, recovery, modernization secondary energy sources, technology attic.

Согласно действующей нормативной базе вентиляция жилых зданий осуществляется за счет инфильтрации путем неорганизованного поступления наружного приточного воздуха в жилые помещения через неплотности в наружных ограждающих конструкциях, форточки или другие приточные устройства. Все энергозатраты на нагрев наружного воздуха, которые значительно превышают теплотери через наружные ограждающие конструкции зданий, компенсируются системой отопления. Удаление вентиляционного воздуха осуществляется из кухонь, ванных и санузлов (помещений с зонами максимального выделения вредностей) организованным путем через вытяжные каналы, с последующим выбросом теплого воздуха в атмосферу через секционные вытяжные шахты. Такая технологическая схема отопления и вентиляции зданий является энергозатратной, так как не использует вторичные и природные энергоисточники.

Для снижения энергопотребления от внешних источников системами отопления и вентиляции зданий необходима модернизация технологических схем и конструктивного исполнения, создание новых технологических решений, разработка теоретических основ тепломассообменных процессов, методики аналитического расчета и проектирования систем отопления и вентиляции зданий с герметичными ограждающими конструкциями по критерию энергоресурсосбережения [2, 3].

В целях повышения энергоэффективности при эксплуатации зданий и повышения надежности в создании комфортных условий проживания системами отопления и вентиляции, разработана технологическая схема вентиляции зданий с использованием объема чердака в качестве не вытяжной, а приточной вентиляционной камеры, при которой значительно снижаются теплопотери и максимально используются вторичные и природные источники энергоресурсов для отопления и вентиляции зданий [4, 5].

Предлагаемое конструктивное решение верхней части многоэтажного здания поясняется принципиальной схемой технологического чердака, представленной на рисунке 1.

В процессе эксплуатации здания технологический чердак работает как объемная вентиляционная приточная камера в следующем аэродинамическом режиме. Наружный воздух при естественной вентиляции за счет сил гравитации, а при вынужденной циркуляции за счет работы крышного вентилятора 15 поступает внутрь чердака через отверстие с регулируемой решеткой 2 в наружных стенах 1, в котором аккумулирует трансмиссионную теплоту, теряемую зданием через перекрытие верхнего этажа 3, а также теплоту солнечной радиации, воспринимаемую через верхнее покрытие 4 и далее через входной патрубок 6 поступает в рекуператор 5, в котором дополнительно подогревается за счет теплоты, содержащейся в вытяжном воздухе, а окончательно догревается в калорифере 10 до расчетных значений температуры, который подключен к внешнему теплоисточнику (на рисунке не показан), после чего по приточному 11 и распределительным воздуховодам подается в вентилируемые помещения [1].

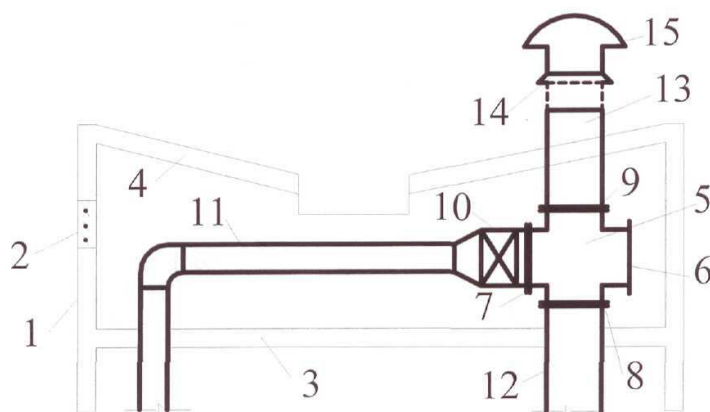


Рисунок 1. – Технологический чердак здания

Предлагаемая конструкция чердака представляет собой инновационную модернизацию всех известных и применяемых ранее конструкций чердаков зданий и предназначена для широкого внедрения в практику градостроительства благодаря многоступенчатой схеме использования вторичных энергоресурсов и природной теплоты солнечной радиации с целью снижения энергоемкости при строительстве и эксплуатации жилья и улучшения условий проживания.

Для минимизации теплопотребления от внешних энергоисточников и снижения материальных и энергетических затрат при строительстве и эксплуатации зданий с улучшенными качествами воздушной среды и комфортными условиями проживания предлагается энергоресурсоэффективное устройство тепловой вентиляции с использованием вторичных и природных энергоисточников.

Устройство тепловой вентиляции, представленное на рисунке 2, состоит из вытяжного канала 5 с ответвлениями 6 для подключения поэтажной разводки вытяжной вентиляции, к которой сверху через первый патрубок 1 присоединена теплообменная камера 7, выполненная в виде пластинчатого теплоутилизатора, установленного в объёме технологического чердака 8 и имеющая второй патрубок 2, который через выводной канал 9, воздушный клапан 10 и крышный вентилятор 11 открыт в атмосферу, третий патрубок 3 теплообменной камеры 7 с установленным воздушным фильтром 12 открыт в объём технологического чердака 8, а четвертый патрубок 4 с воздухонагревателем 13 соединён с воздухораспределительной системой 14 приточного вентиляционного воздуха и через ответвления 15 подключен к поэтажной разводке приточного воздуха, технологический чердак 8 через регулирующую решётку 16 аэродинамически соединён со щелевым каналом 17, образованным наружным вертикальным ограждением 19 здания и навесным вентилируемым светопрозрачным фасадом 18 и имеющим сверху воздушный клапан 20, а снизу – щелевое отверстие 21, открытое в атмосферу.

Принцип работы устройства тепловой вентиляции заключается в том, что тёплый отработанный вытяжной вентиляционный воздух под действием сил гравитации по вытяжному каналу 5 поднимается вверх, способствуя его удалению через ответвления 6 поэтажной разводки из вентилируемых помещений, и через первый патрубок 1 поступает в тепловую камеру 7 пластинчатого теплоутилизатора, в которой через теплообменные поверхности отдаёт теплоту наружному воздуху и через патрубок 2, выводной канал 9, воздушный клапан 10 или крышный вентилятор 11 удаляется в атмосферу, формируя, таким образом, вытяжной аэродинамический контур тепловой вентиляции здания.

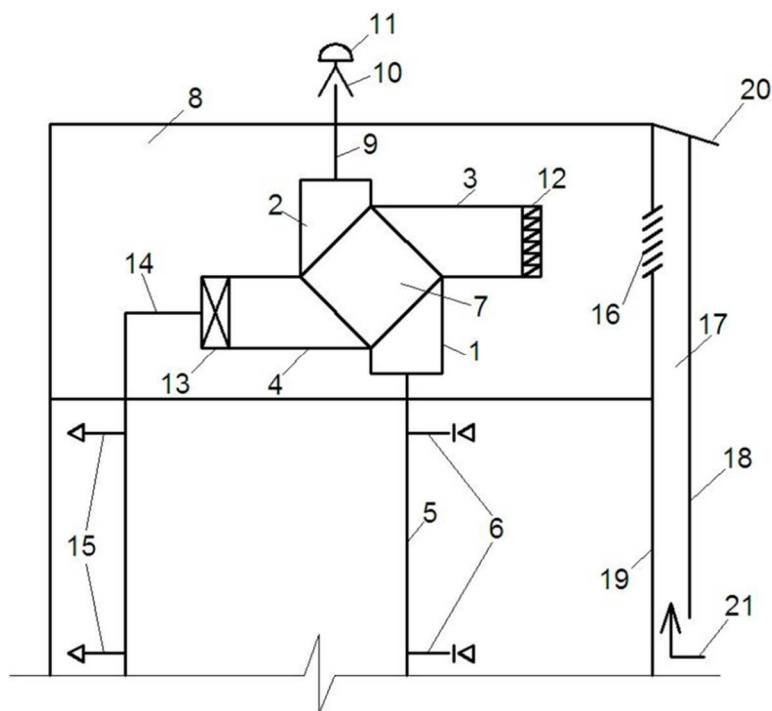


Рисунок 2. – Принципиальная схема устройства тепловой вентиляции

Одновременно с этим работает приточный аэродинамический контур, в котором наружный воздух под действием разряжения в здании, создаваемого вытяжным аэродинамическим контуром, через щелевое отверстие 21 поступает в щелевой канал 17, где воспринимает и аккумулирует с наружной поверхности наружных ограждающих конструкций стен и окон трансмиссионную теплоту, теряемую зданием круглосуточно в течение всего отопительного периода, а в дневное время суток дополнительно воспринимает и аккумулирует теплоту прямой и рассеянной солнечной радиации через навесной вентилируемый светопрозрачный фасад за счёт парникового эффекта и по щелевому каналу 17 при движении снизу вверх наружный приточный воздух, предварительно подогретый за счёт вторичных и природных энергоисточников через отверстие с регулируемой решёткой 16 поступает в технологический чердак 8, выполняющий дополнительные функции объёмной приточной вентиляционной камеры, в которой происходит дополнительный подогрев наружного приточного воздуха за счёт теплоты, теряемой через горизонтальные поверхности наружных ограждений потолка в течение всего отопительного периода и горизонтальную поверхность верхнего покрытия чердака за счёт прямой и рассеянной солнечной радиации в дневное время суток, а далее наружный приточный воздух через воздушный фильтр 12 и третий патрубок 3 поступает в теплообменную камеру, где воспринимает и аккумулирует через теплообменные пластины теплоту, содержащуюся в вытяжном воздухе, а затем через четвертый патрубок 4 проходит через воздухонагреватель 13, в котором осуществляется окончательный нагрев его до расчётных значений по температуре  $t_{пр}$ , необходимой для компенсации всех теплопотерь помещений, обслуживаемых тепловой вентиляцией, которая через воздухораспределительную систему 14 и ответвления 18 подключена к поэтажной разводке приточного воздуха.

Устройство тепловой вентиляции способно работать на любых видах энергии от внешнего источника, так как калорифер воздухонагревателя 13 может быть электрическим или подключаться к местной или централизованной системе теплоснабжения.

В тёплый летний период навесной светопрозрачный фасад и технологический чердак здания используются для защиты от солнечной радиации путём открытия воздушного клапана 20, создающего при этом интенсивное движение воздуха снизу вверх в щелевом канале 17 под действием сил гравитации и разнонаправленного ветрового давления с наветренной стороны, обеспечивающего горизонтальное перемещение воздуха в объёме технологического чердака, что таким образом создает интенсивное охлаждение вертикальных и горизонтальных наружных ограждающих конструкций и способствует снижению энергопотребления системами кондиционирования микроклимата зданий при холодоснабжении.

Рациональное использование тепловой и электрической энергии, природных и вторичных источников, утилизации тепловых отходов и низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов позволяет значительно снизить энергопотребление в строительной отрасли и повысить термодинамическую эффективность в коммунально-бытовой сфере экономики.

По результатам выполненных расчетов по минимизации теплопотребления от внешних энергоисточников на отопление и вентиляцию жилых модернизированных зданий с технологическими чердаками видно, что при базовой нагрузке на систему отопления  $Q_{от} = 149\ 159$  Вт нагрузка снижается на 73,5% и составляет  $Q_{лот} = 39\ 406$  Вт, а при значениях  $t_n = -3,2^\circ\text{C}$  выше средних значений за отопительный период не только полностью исключается нагрузка на обогрев и вентиляцию здания от внешних энергоисточников (рис. 3), но и обеспечивается значительная экономия материальных средств и энергоресурсов (рис. 4) [4].

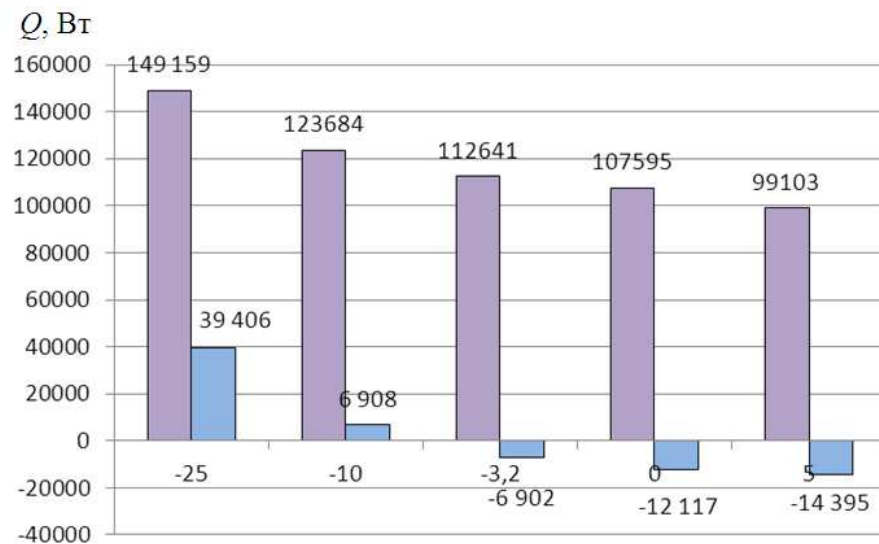


Рисунок 3. – Изменение нагрузки на систему отопления при модернизации здания

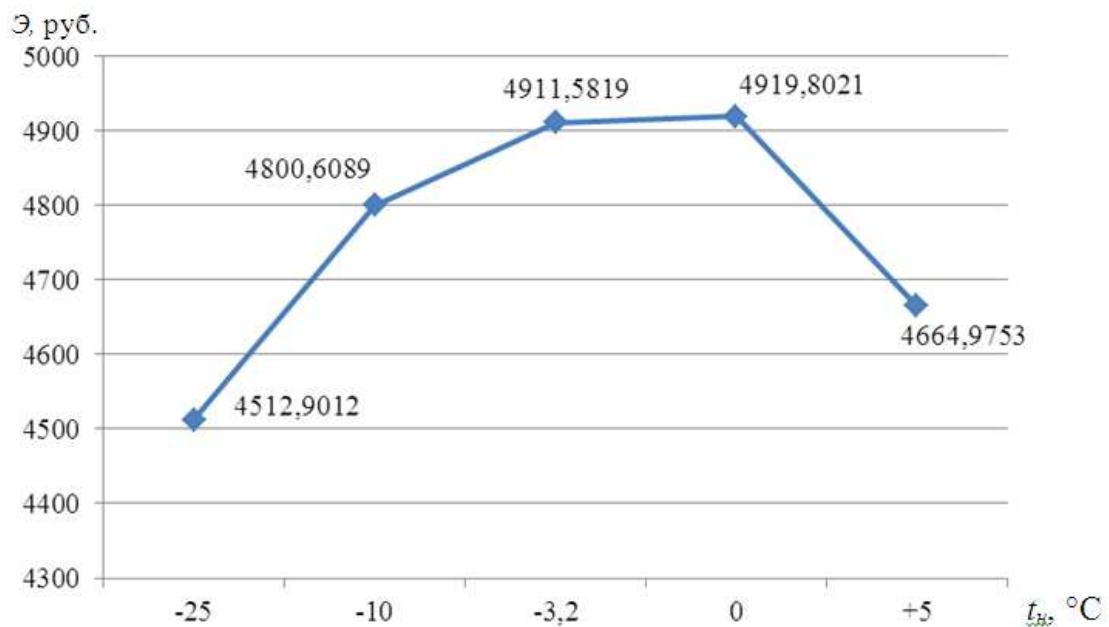


Рисунок 4 – Экономический эффект от модернизации жилого здания

Выполненные исследования доказали, что перспективным направлением в области совершенствования отопительно-вентиляционной техники и энергетического оборудования зданий являются приточно-вытяжные системы вентиляции зданий, в которых возможно применение энергоэффективных приемов снижения теплопотребления за счет рекуперации трансмиссионной теплоты, утилизации теплоты удаляемого воздуха, использования солнечной и ветровой энергии как нескончаемых природных источников, а также круглогодичного использования низкопотенциальной теплоты в системах кондиционирования микроклимата. В таких системах расходы на вентиляцию за счет утилизации теплоты удаляемого воздуха снижаются более чем на 70%, упрощается автоматизация и повышается надежность в результате понижения водяного объема системы, снижается опасность размораживания системы воздушного обогрева и упрощается диспетчеризация и дистанционное управление при компьютеризации, снижается энергопотребление насосного оборудования.

Рациональное использование тепловой и электрической энергии, природных и вторичных источников, утилизация тепловых отходов и низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов на основе передовых достижений науки и техники, позволяющих снизить энергопотребление в строительной отрасли и повысить термодинамическую эффективность в коммунально-бытовой сфере экономики, являются в настоящее время стратегической базой при дальнейшем решении практических задач по снижению энергоемкости в градостроительстве [6, 7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рекуперативное устройство приточно-вытяжной вентиляции здания : пат. № 8381 Респ. Беларусь : МПК F24D7/00/ В.И. Липко, С.В. Липко ; дата публ.: 04.03.2012.
2. Липко, В.И. Инновационная модернизация систем тепловоздухоснабжения чердачных зданий по критерию энергосбережения / В.И. Липко, С.В. Ланкович // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия, Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2015. – № 2. – С. 52–55.
3. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение чердачных зданий / В.И. Липко, С.В. Ланкович, А.С. Лапезо // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. С. 89–97.
4. Ланкович, С.В. Конструктивно-технологическая инновационная разработка энергоэффективных систем тепловой вентиляции зданий с технологическими чердаками с использованием вторичных и природных энергоресурсов для минимизации теплопотребления от внешних энергоисточников / С.В. Ланкович, В.И. Липко // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 37–43.
5. Липко В.И. Энергоресурсоэффективные системы тепловоздухоснабжения жилых зданий повышенной теплозащиты / В.И. Липко, О.Н. Широкова, А.С. Лапезо // Новое в технике и технологии в текстильной и легкой промышленности : материалы докладов Междунар. науч.-техн. конф. / Витеб. гос. технол. ун-т. – 2015. – С. 285–287.
6. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий: в 2 т. / В.И. Липко. – Т. 1. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2004. – 212 с.
7. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий: в 2 т. / В.И. Липко. – Т. 2. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2004. – 392 с.

## К ВОПРОСУ МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ШКОЛ

А.М. Нияковский

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.m.niyakovski@psu.by

*На основании результатов проведённого энергетического обследования здания общеобразовательной средней школы в г.Новополоцке выполнен анализ работы существующих в соответствии с первоначальным проектом систем вентиляции, выявленных недостатки и обоснованы направления модернизации в целях улучшения санитарно-гигиенических качеств и повышения энергетической эффективности здания.*

*Ключевые слова: здания школ, системы вентиляции, качество воздушной среды, энергетическое обследование, энергетическая эффективность, модернизация.*

## ON THE QUESTION OF MODERNIZATION OF SECONDARY SCHOOLS VENTILATION SYSTEMS

A. Niyakovski

Polotsk state University, Belarus

email: a.m.niyakovski@pdy.by

*Based on the results of the energy survey of the secondary school building in Novopolotsk, the analysis of the existing ventilation systems was carried out, its shortcomings were identified and the directions of its modernization were substantiated in order to improve the hygienic qualities and the energy efficiency of the building.*

*Keywords: school buildings, ventilation systems, air quality, Energy Efficiency, Energy Analysis, modernization.*

В 2016–2017 годах специалистами Учреждения образования «Полоцкий государственный университет» по инициативе Новополоцкого городского исполнительного комитета было проведено энергетическое обследование Государственное учреждение образования «Базовая школа №10 г.Новополоцка» (далее – БШ № 10) в целях обеспечения контроля за экономией и рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов в системе образовательных учреждений и разработки энергосберегающих мероприятий.

Теплоснабжение БШ № 10 производится централизованно от централизованных водяных тепловых сетей. Присоединение систем отопления и горячего водоснабжения к наружным тепловым сетям осуществляется посредством индивидуальных тепловых пунктов, в которых установлено необходимое оборудование.

Ограждающие конструкции здания школы имеют степень тепловой защищённости, определяемую годом постройки (до 1980), а также фактическим состоянием стен, окон, покрытий, фундаментов. Конструкций, подвергнутых тепловой реабилитации, в здании не имеется.

Вентиляция здания БШ № 10 является приточно-вытяжной с механическим побуждением. Подача приточного воздуха в соответствии с проектом осуществляется непосредственно в обслуживаемые помещения из централизованной приточной камеры, находящейся в подвале здания. Наружный воздух через воздухозаборную шахту поступает с улицы,



очищается, подогревается и/или смешивается в приточной камере с внутренним воздухом и подаётся по системе воздуховодов в обслуживаемые помещения. Системы вентиляции не оборудованы устройствами управления, поэтому воздух подаётся во все помещения одновременно в постоянном объёме. Удаления воздуха осуществляется из рекреаций и коридоров системами воздуховодов посредством крышных вентиляторов.

Данное проектное решение не отвечает современным представлениям об эффективной вентиляции по следующим основаниям:

- система вентиляции подаёт приточный воздух во все учебные помещения одновременно, вне зависимости от наличия в них людей;
- подача воздуха в аудитории производится с постоянным расходом, вне зависимости от потребности в нём, определяемой состоянием и качеством микроклимата помещений;
- удаление воздуха осуществляется без утилизации (возвращения и полезного использования) теплоты, содержащейся в удаляемом воздухе;
- при эксплуатации систем вентиляции в реальных условиях механическая вентиляция чаще всего отключается по экономическим соображениям, взамен неё осуществляется регулярное проветривание классов путём открывания окон, при этом теплота внутреннего воздуха выбрасывается наружу и в итоге, для восстановления необходимой температуры внутреннего воздуха требуется увеличивать затраты энергии на отопление;
- заполнения оконных проёмов, спроектированные по ранее действовавшим стандартам, предусматривают неплотности для пропуска инфильтрационного воздуха, что при отключённой приточной вентиляции ведёт к необоснованному росту тепловых потерь на нагрев этого воздуха.

Используемая система вентиляции не обеспечивает требуемые параметры микроклимата в помещениях школы энергоэффективным способом. Наиболее востребованным энергосберегающим мероприятием при модернизации общественных зданий является замена существующих воздухопроницаемых окон на герметичные стеклопакеты с повышенным теплозащитными свойствами.

В этом случае важной научной и методической проблемой является верный выбор соотношений между энергосберегающими и санитарно-гигиеническими эффектами, а также между централизацией и децентрализацией вентиляции, чтобы экономия топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) не достигалась в результате ухудшения параметров микроклимата и в первую очередь качества воздушной среды.

Основными вредностями в школьных помещениях являются продукты жизнедеятельности человека, в первую очередь углекислый газ. Это положение было введено в гигиеническую практику *M. Pettenkofer* еще в позапрошлом веке. Кроме углекислого газа загрязнителями воздуха в помещениях школ выступают антропогенные, а также вредные выделения, содержащиеся в приточном наружном воздухе, и вредные выделения от элементов интерьера помещения – ограждающих конструкций, покрытий, предметов обстановки и т. п.

Строительными регламентами Европейского Союза (ЕС), в частности, установлено, что концентрация  $\text{CO}_2$  в классных комнатах на протяжении продолжительного времени не должна превышать 1000 ppm. Допускается отклонение от этой нормы не чаще одного раза в день продолжительностью не более 20 минут.

Нами на основании экспоненциальной модели поступления, накопления и удаления вредных веществ был выполнен сравнительный анализ эффективности работы систем вентиляции в учебных помещениях школьных зданий, результаты которого представлены на рисунке. Расчёты и обработка результатов натурных измерений произведены с использованием программных продуктов фирмы EXHAUSTO [1]. Данная работа является продолжением цикла исследований, результаты которых изложены в [3–5]. При проведении исследования были использованы материалы, содержащиеся в работе [2].

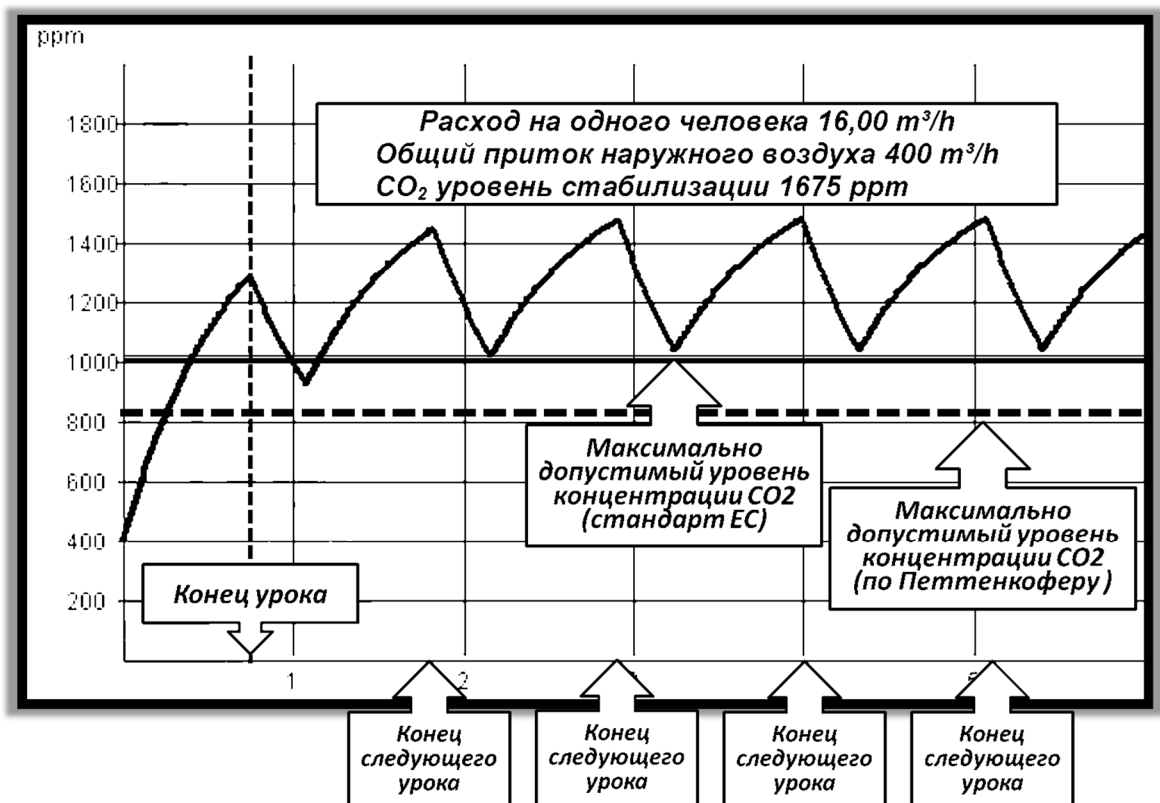
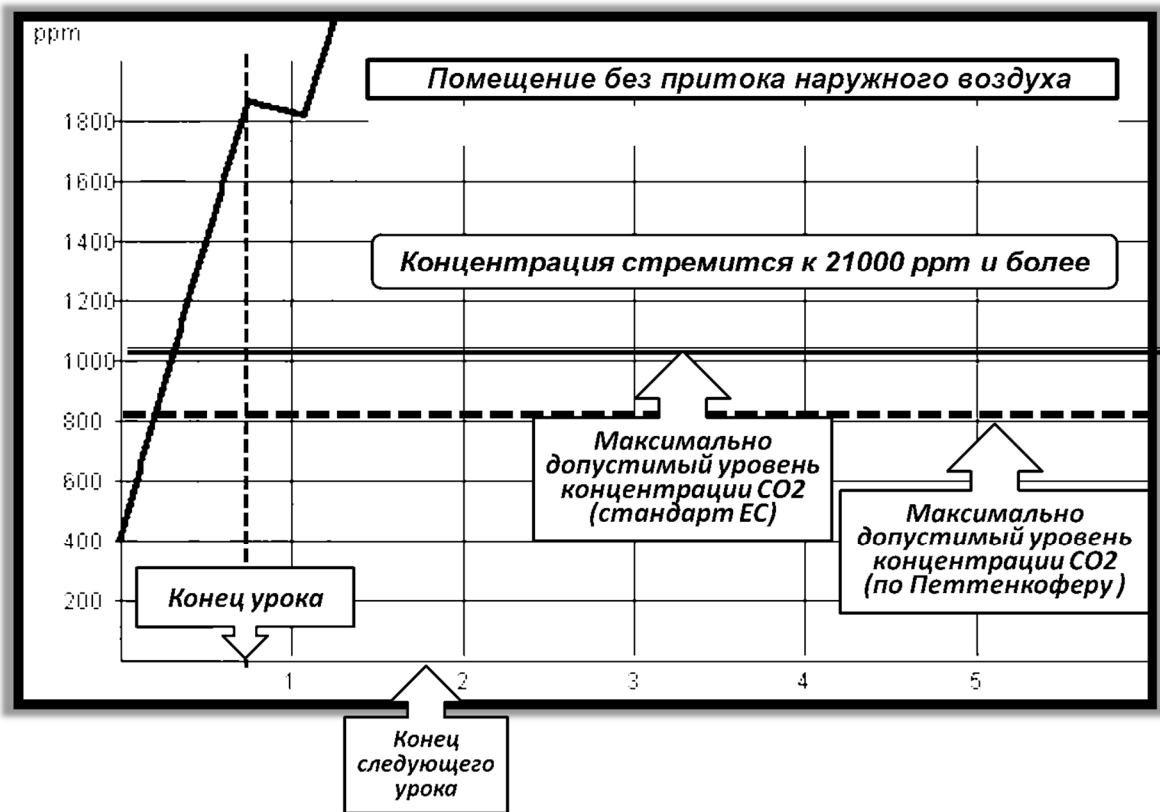


Рисунок. – Влияние воздухообмена на уровень содержания CO<sub>2</sub> в воздухе учебных классов общеобразовательной школ при использовании воздухонепроницаемых светопрозрачных заполнений оконных проёмов (вверху – при отсутствии приточно-вытяжной вентиляции, внизу - при нормативном воздухообмене)

Как следует из приведённых выше рисунков, в отсутствие организованного воздухообмена при использовании воздухопроницаемых светопрозрачных заполнений оконных проёмов концентрация  $\text{CO}_2$  в воздухе учебных классов стремительно нарастает и уже к середине урока начинает превышать допустимый рекомендуемый уровень в 1000 ppm. Таким образом, предписываемое школьными правилами проветривание помещений на переменах не способно обеспечить в течение времени урока требуемое качество микроклимата. Тем более, что проветривание ведёт к нерациональному использованию ТЭР.

Не достигаются требуемые его показатели и при организации нормативного воздухообмена из расчёта  $16 \text{ м}^3/\text{ч}$  на одного ученика.

В результате, при работающей вентиляции имеет место рост затрат на эксплуатацию школьных зданий, а при неработающей – ухудшение состава воздуха в помещениях во время занятий и их выхолаживание за счёт инфильтрации и проветривания естественным образом в перерывах. В последнем случае для компенсации понижения температуры воздуха приходится или увеличивать потребление теплоты на отопление, или мириться с низкой температурой воздуха в помещениях в первое время после проветривания.

Этих недостатков можно избежать, если произвести децентрализацию систем вентиляции помещений школы путём внедрения специальных местных приточно-вытяжных теплоутилизационных установок.

Рынок вентиляционного оборудования предлагает различные технические решения: стеновые регенеративные приточно-вытяжные теплоутилизаторы попеременного действия, стеновые рекуперативные приточно-вытяжные теплоутилизаторы непрерывного действия, приточно-вытяжные вентиляционные установки с теплоутилизаторами «шкафного» типа, приточно-вытяжные вентиляционные установки с теплоутилизаторами «подвесного», «настенного» или «канального» типов.

Производительность предлагаемых устройств от 30 до 1000  $\text{м}^3/\text{ч}$ , в то время как применительно к школьным помещениям с наполняемостью от 20 до 35 учащихся требуется создавать воздухообмен от 320 до 560  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

В таблице представлено сравнение характеристик предлагаемого вентиляционного оборудования для децентрализованных систем вентиляции. Выбор представленных в таблице аналогов носит иллюстративный характер и не свидетельствует о предпочтительности любого из них.

Таблица. – Сравнение характеристик устройств децентрализованной приточно-вытяжной вентиляции

Параметр	Устройство			
	«Паветрик»	«Metle M-WRG»	«Прана 200 С»	«EXHAUSTO VEX308»
1	2	3	4	5
Приток, $\text{м}^3/\text{час}$	20...30	30...60	235	150...800
Размещение	В стене	В стене	В стене	В помещении
Возможность догрева	Нет	Нет	Нет	Да
Эффективность рекуперации (по данным изготовителя)	0,9	0,76	0,6...0,8	0,8...0,9

Исходя из режимов эксплуатации учебных классов школ, наиболее подходящими для использования в системах децентрализованной вентиляции являются устройства, технические характеристики которых соответствуют аналогам, представленным в 4 и 5 столбцах таблицы 1.

Принцип работы подобных рекуператоров основан на принудительном нагнетании с улицы холодного свежего воздуха и удалении из помещения тёплого отработанного воздуха механическим способом с использованием тепла удаляемого из помещения воздуха для нагрева приточного воздуха. За счёт прохождения воздушных потоков через систему теплообменников, расположенных внутри рабочего модуля, тёплый вытяжной воздух отдаёт большую часть своего тепла холодному приточному воздуху.

Для обеспечения вентиляции школьного класса достаточно одной установки производительностью по приточному воздуху 400...500 м<sup>3</sup>/ч. Внедрению этих устройств в обязательном порядке должна предшествовать установка герметичных пластиковых окон.

При использовании децентрализованных систем вентиляции школьных зданий, основанных на местных приточно-вытяжных установках с теплоутилизаторами, годовая экономия тепловой энергии в расчёте на 30 помещений учебных классов в рассматриваемых условиях БШ 10г.Новополоцка составит не менее 40 Гкал в год. Необходимо также принять во внимание, что данное мероприятие в большей мере имеет социально-гигиеническое, а не энергоэкономическое значение и должно оцениваться с учётом социального эффекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Программы EXHAUSTO для расчёта вентиляционных установок и систем. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.exhausto.ru/projektering](http://www.exhausto.ru/projektering). – Дата доступа: 03.03.2018.
2. Лабораторно-аналитический мониторинг показателей качества воздуха внутри и вне школьных помещений / Т.Н. Пронина [и др.] // Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья. – 2013. – № 3. – С. 39–47.
3. Нияковский, А.М. Выбор оптимальной плотности теплового потока при расчёте тепловой изоляции трубопроводов с целью обеспечения заданного коэффициента полезного действия тепловой сети и снижения выброса вредных веществ в атмосферу / А.М. Нияковский, Ф.И. Москалёнок, А.Ю. Сидорова // Материалы докладов 50 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвящённой году науки. – Т. 1. – Витебск : Витеб. гос. технол. ун-т, 2017. – С. 299–302.
4. Нияковский, А.М. К выбору плотности теплового потока при проектировании тепловой изоляции тепловых сетей / А.М. Нияковский, Э.И. Гончаров, О.И. Мишута // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 8. – С. 147–155.
5. Нияковский, А.М. Управление температурными режимами тепловых сетей с целью снижения энергопотребления в системах теплоснабжения / А.М. Нияковский, В.А. Пшеничнюк, А.В. Григорович // Материалы докладов 48 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвящённой 50-летию университета : в 2 т. – Т. 2. – Витебск : Витеб. гос. технол. ун-т, 2015. – С. 76–78.

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОТЕРЬ ВОДЫ ЖИЛОГО ФОНДА г. НОВОПОЛОЦКА  
ПРИ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ НАСЕЛЕНИЮ

В.Д. Ющенко, Е.В. Лесович, Е.С. Велюго

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: yuvd46@mail.ru

Ю.В. Зыкова

Жилищно-ремонтная эксплуатационная организация, Новополоцк, Беларусь

*Приводятся результаты исследований по установлению причин потерь воды, при ее подаче от наружного водоснабжения к потребителям жилого фонда г. Новополоцка. Произведена оценка потерь воды на основании обработки данных производственного коммунального унитарного предприятия «Новополоцкводоканал» и Ново-полоцкого коммунального унитарного предприятия «Жилищно-ремонтная эксплуатационная организация». Выполнен анализ полученных результатов.*

*Ключевые слова: наружное водоснабжение, внутренний водопровод, потери воды, жилой фонд, потребители.*

ANALYSIS OF CAUSES OF WATER LOSSES OF THE RESIDENTIAL FUND IN NOVOPOLOTSK  
UNDER ITS IMPLEMENTATION TO POPULATION

V. Yushchenko, E. Lesovich, E. Velyugo

Polotsk State University, Belarus

email: yuvd46@mail.ru

Y. Zyкова

Housing-operational repair organization, Novopolotsk, Belarus

*In the article results of researches on an establishment of the reasons of losses of water, at its submission from external water supply to consumers of an available housing of a city of Novopolotsk are resulted. The water loss was estimated on the basis of the data processing of the production communal unitary enterprise Novopolotskvodokanal and Novopolotsk municipal unitary enterprise "Housing and repair operating organization". The analysis of the results is performed.*

*Keywords: external water supply, indoor plumbing, water losses, housing stock, consumers.*

**Общая часть.** На современном этапе развития коммунального водоснабжения городов Беларуси для сокращения водопотребления и устранения непроизводительных затрат особую актуальность приобретают вопросы оценки и управления утечками воды, поскольку они оказывают существенное влияние на себестоимость водопроводно-канализационных услуг. Для населения большие потери воды приводят к увеличению оплаты за пользование системами внутреннего холодного и горячего водоснабжения.

Совокупность инженерных устройств для подачи воды из наружного водопровода здания к водоразборным приборам с требуемым напором называют системой внутридомового водоснабжения здания или внутренним водопроводом. Т.е., это система трубопрово-

дов и устройств, обеспечивающая подачу воды к санитарно-техническим приборам, пожарным кранам и технологическому оборудованию, обслуживающая одно здание или группу зданий и сооружений и имеющая общее водоизмерительное устройство от наружной (городской) сети водопровода населенного пункта.

Системы внутреннего водопровода включают: вводы в здания, водомерные узлы, магистральную и разводящую сеть, стояки, подводки к санитарным приборам и технологическим установкам, водоразборную, смесительную, запорную и регулирующую арматуру. В отдельных случаях, при необходимости имеются установки для повышения напора, а также установки для дополнительной обработки воды (умягчения, обесцвечивания, обезжелезивания и др.) /1–3/.

**Потери воды жилого фонда г. Новополоцка.** Во внутреннем водопроводе потери воды складываются из утечек и непроизводительных расходов и еще в начале 2000 годов составляли до 30...35 %, особенно в частном секторе /1/.

При потерях воды до 10...15 % проводят техническое обслуживание системы водопровода, осматривают и ремонтируют арматуру и трубопроводы. Если потери воды достигают 15...25 %, то проводят текущий ремонт системы, при котором, наряду с ликвидацией утечек воды в системе, принимают меры по сокращению непроизводительных расходов. При потерях воды 25 % и более необходимо производить капитальный ремонт системы.

Утечки воды принято считать постоянными потерями, которые образуются в результате промывки труб, особенно стояков систем горячего водоснабжения и отопления (при закрытой системе подачи теплоносителя); нарушения герметичности водоразборной или трубопроводной арматуры в магистральных и распределительных линиях и стояках, в стыковых соединениях и т.д.

Непроизводительные расходы в основном обусловлены протечками водоразборной арматуры, при наличии перед ними повышенного давления, прежде всего, от наружного водопровода, которые снижают путем установки стабилизаторов или регуляторов давления, либо диафрагмированием системы. Регуляторы давления располагают, как правило, после водомерного узла и насосной установки. Диафрагмирование системы позволяет снизить давление перед водоразборной арматурой, установленной на нижних этажах здания, что в свою очередь сокращает секундные расходы воды через арматуру.

Для экономного и планового ведения водопроводного хозяйства в населенном пункте очень важно, чтобы осуществлялось соответствие показаний счетчиков водопотребителей с прибором учета на отдельное здание или группу зданий. В некоторых случаях жители могут незаконно манипулировать с приборами учета воды (уменьшая число оборотов рабочего органа счетчика) или их показаниями, особенно если жильцы потратили в месяц меньше установленного льготного тарифа. Причем, не все потребители своевременно оплачивают счета согласно показаниям счетчиков.

Фактический объем потребления воды в квартирах без счетчика, или там, где показания (за отчетный период) не учитываются, неизвестен. В квартирах, где нет счетчиков, оплату производят исходя из зарегистрированного в квартире количества людей, которое нельзя проконтролировать (заявлен один человек, а проживает в квартире семья или квартира сдается в аренду).

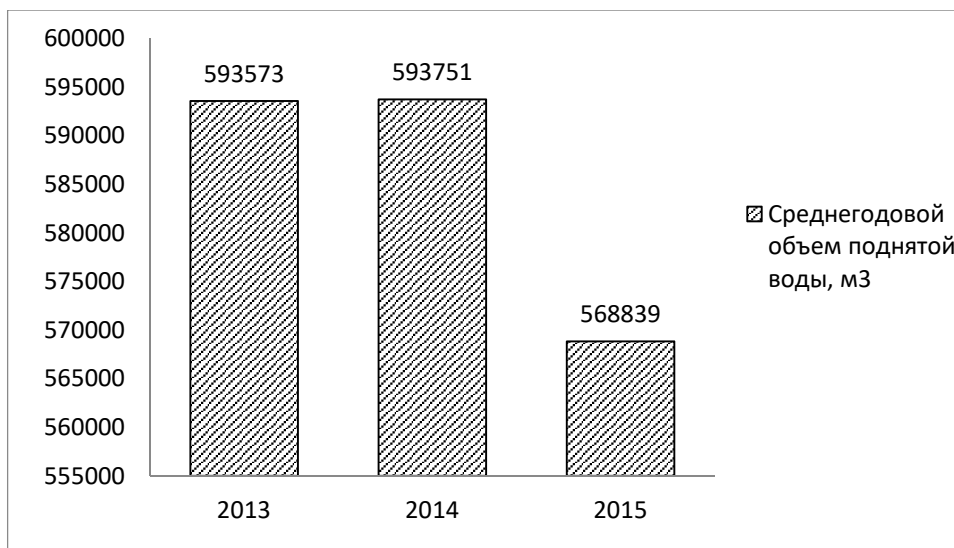
**Объекты обследования:** Жилые дома г. Новополоцка, обслуживаемые Новополоцким коммунальным унитарным предприятием (НКУП) «Жилищно-ремонтная эксплуатационная организация». Вода в здания жилого фонда подается от наружного водопровода филиалом «Новополоцкводоканал» Витебского областного КУП ВКХ «Витебскоблводоканал».

**Цель обследования:** определить разницу в подаваемых объемах воды на участке «сеть наружного водопровода» - «внутренние системы холодного водоснабжения зданий жилого фонда», а также установить основные причины ее потерь.

Новополоцкий водопровод – это на 100% подземная артезианская вода, которая добывается на водозаборе "Окунево" со среднесуточным потреблением жилого фонда с учетом местной промышленности (без подачи воды производствам и другим категориям потребителей) порядка 14...17 тыс. м<sup>3</sup>. Общие потери воды на участке «скважины – потребитель» составляют порядка 17,5% /4/.

Потери воды в системах внутреннего холодного и горячего водоснабжения ввиду наличия разноэтажных зданий в микрорайонах г. Новополоцка различных лет постройки (до 50 лет) определить очень сложно. Большое значение в предотвращении утечек воды непосредственно в квартирах имеет установка в каждой квартире водосчетных устройств (свыше 90%).

В целом для города была произведена обработка данных филиала «Новополоцкводоканал» Витебского областного КУП ВКХ «Витебскоблводоканал» по подаче воды в жилой фонд города и ее реализация населению за 2013-2015 гг, включая нужды местной промышленности и социальных объектов (рис. 1 и 2).



**Рисунок 1. – Среднегодовой объем воды, поданный для обеспечения водоснабжением жилого фонда г. Новополоцка в 2013–2015 гг.**

Анализ полученных результатов показал, что общие потери воды на участке сеть наружного водопровода - внутренние системы холодного водоснабжения зданий жилого фонда в 2013 г. составили порядка 9,0%, 2014 г. – 8,2%, 2015 г. – 8,6%, и в среднем составила 8,6%.

Сравнительно низкие показатели общих потерь обуславливаются особенностью жилого фонда г. Новополоцка. Практически, в отсутствие частного сектора, все здания города представляют собой многоэтажные дома социального сектора и оборудуются централизованными санитарно-техническими системами. Они представляют собой единый комплекс инженерных коммуникаций канализации, холодного и горячего водоснабжения, отопления, газоснабжения, мусороудаления, водостоков и необходимы для того, чтобы строения полностью соответствовали всем современным требованиям комфортабельности и благоустроенности. Их технический уровень, в общем и целом, во многом определяет то,

насколько качественно реализовано жизнеобеспечение, как отдельных зданий, так и населенных пунктов.

Для устойчивого сохранения потерь воды с постепенным их снижением нужно выполнять следующие требования и положения /5, 6/.

Планомерное проведение различных видов проверок, осмотров и ремонтов позволит значительно снизить непроизводственные потери воды. Например, применение новой водосберегающей арматуры, установка регуляторов давления, расширение систем горячего водоснабжения с рециркуляцией воды. Замена старых водопроводных сетей на новые должна производиться в первую очередь. Особенно приветствуются трубопроводы из новых полимерных материалов, хорошо зарекомендовавших себя в процессе исследований и эксплуатации.

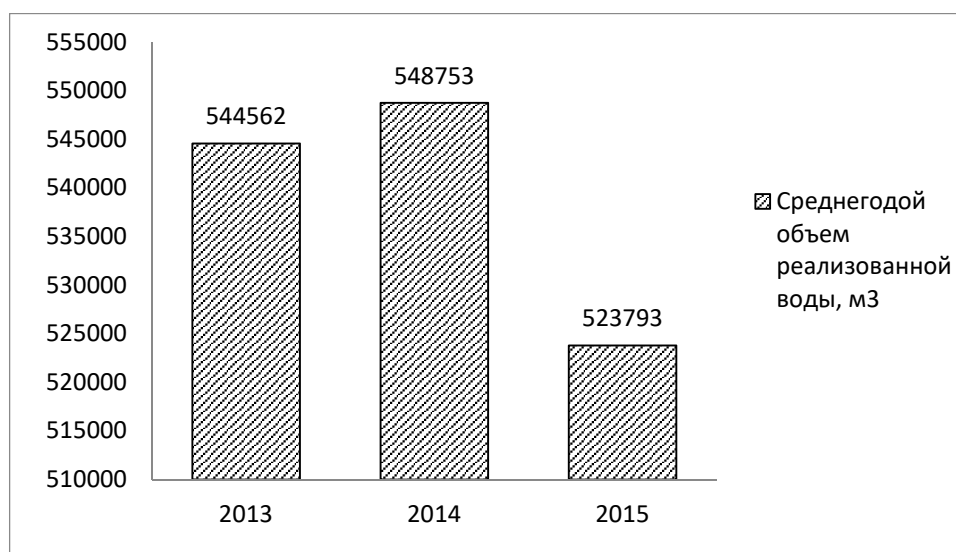


Рисунок 2. – Среднегодовой объем реализованной воды для обеспечения водоснабжением населения г. Новополоцка в 2013-2015 гг.

При превышении требуемых напоров воды в зданиях и сооружениях необходимо их снижение до нормального уровня, что должно уменьшить потери воды и обеспечить экономию энергозатрат на ее подачу к потребителю. Этот метод довольно доступный и не требует капитальных земляных работ и огромных финансовых инвестиций.

Правильным решением будет покупка качественной водоразборной арматуры последних моделей известных фирм-производителей, которая способна работать безотказно многие годы. Установка приборов учета воды стимулирует потребителя меньше совершать ненужные сливы в систему канализации. Особенно если они обладают различными функциями для достижения стойкого водосбережения и обеспечивают передачу фактического объема расходуемой воды непосредственно в обслуживающую организацию.

Необходимо постоянно, но не реже 1 раза в 2 месяца производить учет воды контрольными водосчетчиками потребителей, не имеющими на своих вводах измерительных устройств, и для исчисления конкретных норм водопотребления для учреждений, организаций и предприятий с пересчетом расхода воды по числу дней работы, а для населения - по числу календарных дней в месяце.

Целесообразна установка специальной системы по защите от утечек воды, которая способна отключать подачу воды от стояка в случае проявления негерметичности в системе.



Таким образом, можно практически исключить данные утечки, что позволит обнаружить и локализовать их очень быстро. Такое решение даст еще больший эффект, если его закрепить законодательно.

Немаловажное значение имеет пропаганда экономии воды, что поможет снизить непроизводительные расходы в системе. Полезны всевозможные брошюры, выпускаемые эксплуатирующими организациями (водоканалами), в которых четким и понятным языком излагаются основные моменты и технические решения, позволяющие потребителю довести водопотребление в своей квартире до надлежащего экономного уровня.

**Вывод.** Полученные данные позволяют решать вопросы при разработке мероприятий, которые должны привести к устранению потерь и существенно сократить объемы водопотребления и водоотведения, повысив качество работы водопроводных и канализационных систем без дополнительного расширения, в т.ч. и нового строительства. Ликвидация потерь и утечек в жилищном фонде позволит увеличить полезную мощность внутреннего водопровода и канализации, исключить отрицательное воздействие утечек воды на фундаменты и другие строительные конструкции зданий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белецкий, Б.Ф. Санитарно-техническое оборудование зданий (монтаж, эксплуатация и ремонт) / Б.Ф. Белецкий. – Ростов н/Д : Феникс, 2002. – 512 с.
2. Системы внутреннего водоснабжения зданий. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-4.01-52-2007. – Минск : Минскстройархитектура, 2008 – 47 с.
3. Житенёв, Б.Н. Санитарно-техническое оборудование зданий : учеб. пособие для учащихся специальности «Санитарно-техническое оборудование зданий и сооружений» учреждений, обеспечивающих получение сред. спец. образования / Б.Н. Житенёв, Г.А. Волкова, Н.Ю. Сторожук. – Минск : Выш. шк., 2008. – 190 с.
4. Зыкова, Ю.В. К вопросу определения и анализа потерь воды в коммунальном водоснабжении крупных населенных пунктов / Ю.В. Зыкова, Е.В. Лесович, В.Д. Ющенко // Актуальные проблемы природообустройства региона : сб. науч. тр. – Калининград : Изд-во КГТУ, 2017. – С. 95–102.
5. Музалевская, Г.Н. Инженерные сети городов и населенных пунктов : учеб. пособие / Г.Н. Музалевская. – М. : Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2006. – 148 с.
6. Методические рекомендации по технической эксплуатации жилищного фонда. МЖКХ РБ, 2009. – 19 с.

## ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ КУЛЬТОВЫХ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

С.И. Пивоварова, Д.А. Василевич, Н.А. Василевич  
Полоцкий государственный университет, Беларусь  
email: pivovar-svetlana@mail.ru; s.i.pivovarova@psu.by

*Рассмотрено использование солнечной энергии для систем вентиляции и отопления культовых зданий церкви и собора. В связи с ухудшением экологической обстановки на Земле, увеличением стоимости на первичные энергоресурсы стала развиваться политика энергосбережения в мире и Республике Беларусь. Уже более десяти лет активно проектируются здания с использованием нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, где солнечная и ветровая энергии, энергии грунта земли и грунтовых вод позволяют экономить тепловую и электрическую энергии в системах воздушного и водяного отопления и в системах вентиляции зданий.*

*Ключевые слова: энергоэффективный дом, системы вентиляции, система отопления, солнечный экодом, плоский коллектор солнечной энергии, церковь, собор, «стены Тромба», энергосбережение, «зелёная» экономика.*

## ENERGY-SAVING THE SYSTEMS HEATING AND VENTILATIONS OF CULT BUILDING WITH THE USE OF UNCONVENTIONAL ENERGY SOURCES

S. Pivavarava, D. Vasilevich, M. Vasilevich  
Polotsk State University, Belarus  
email: pivovar-svetlana@mail.ru; s.i.pivovarova@psu.by

*It is considered in this article use of sunny energy for the systems of ventilation and heating of cult building of church and cathedral. In connection with worsening of ecological situation on Earth, the increasing cost of energy, the shortage of primary energy and development of energy efficiency policy in the world and the Republic of Belarus. Already more than ten years, building is actively designed with the use of unconventional and renewable energy sources, where sunny and wind to energy, energies of soil of earth and subsoil waters allow to save thermal and electric to energy in the systems of the air and aquatic heating and in the systems of ventilation of building.*

*Keywords: energy-efficient House, ventilation system, heating system, sunny ecohouse, flat solar collector, chapel, cathedral, «Trombe wall», energy efficienc, «green» economy.*

В мире, с возрастанием использования возобновляемых источников энергии увеличилось строительство энергоэффективных и экологических зданий, а также проектирование систем отопления и вентиляции домов с применением этих источников энергии [1–3]. Широкое применение возобновляемых источников энергии связано, в первую очередь, с ухудшением экологической обстановки на Земле, увеличением стоимости на энергоресурсы, де-

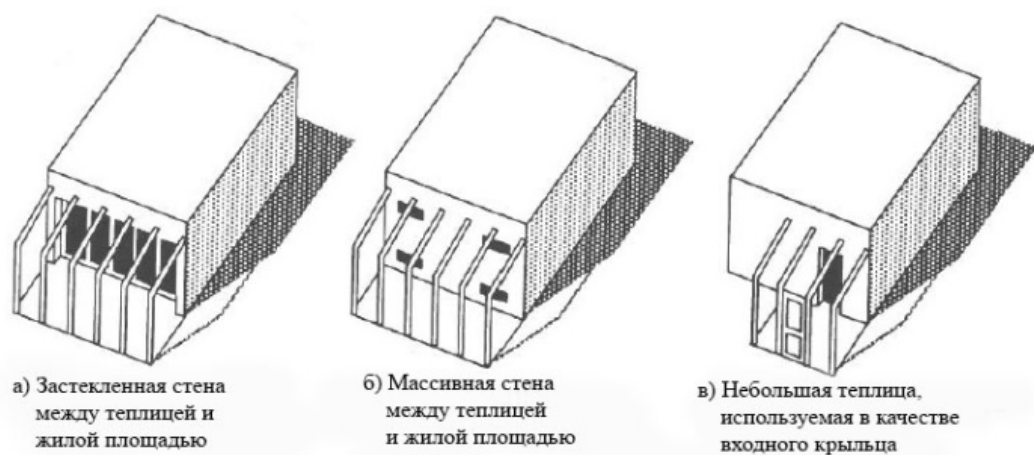
фицитом первичных энергоресурсов и развитием политики энергосбережения в мире и Республике Беларусь [1, 3, 16, 17]. С 2013 г. Республика Беларусь активно стала участвовать в создании модели «зелёной» экономики при сотрудничестве с 38 странами и агентством по возобновляемой энергетике (IRENA), а также поддерживается инициатива ООН и МОТ по обеспечению доступа всем странам к современным энергетическим технологиям, в которых будут создаваться «зелёные» рабочие места. Поставлена задача развивать в Республике Беларусь до 2030 года политику «зеленого» строительства и «зелёной» экономики, которые будут основаны на принципах энергосбережения, внедрения экологических «зеленых» и ресурсосберегающих технологий, возобновляемых и альтернативных источниках энергии, современных местных строительных материалах, эффективных технологиях переработки отходов, развития социальной сферы и создание новых «зелёных» рабочих мест в стране, при этом будут минимизированы в использовании под строительство ландшафтно-рекреационные территории в населенных пунктах [2].

В Республике Беларусь, с утверждением норм на проектирование и строительство жилых и культовых зданий с применением нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, стали шире использовать схемы пассивных солнечных систем и схемы систем вентиляции и отопления с использованием коллекторов солнечной энергии [1, 4, 5]. Однако, мониторинги Департамента по энергоэффективности показывают, что не во всех регионах страны предприятия одинаково активно используют потенциал нетрадиционных и возобновляемых источников энергии для энергосбережения.

Первое упоминание в мире о применении солнечной энергии при строительстве жилого дома для нагрева наружной стены здания относится к работам Эдварда Морса 1800 году, когда он описал эффект нагрева кирпичной наружной стены дома под солнцем (аккумулировать тепло) и длительное остывание её за стеклянной перегородкой в ночное время. Позже в 1960 году это свойство применил в своих дизайнерских проектах французский дизайнер и архитектор Феликс Тромб. Его дизайнерское предложение помещать наружную стену здания за стеклянную раму в 1960 году получило название «стена Тромба». Этот способ аккумулялирования тепла солнечной энергии используют до настоящего времени при строительстве домов, зимних садов и теплиц, однако получил этот способ новое название – пассивная солнечная система воздушного отопления дома. Подобные пассивные системы солнечного отопления жилого дома предложены в главе 16 [5] (рис. 16.3), а также приведены на страницах 110–113 (рис. 5.3–5.6) [6].

Важным в конструкции плоского коллектора солнечной энергии (КСЭ) является размещение «слоёв» и их количество для увеличения количества уловленного теплового потока. Существуют известные схемы конструкций КСЭ (рис. 2) [5, рис. 16.10.].

Одним из способов применения солнечной энергии является энергоэффективное здание «ЭКОДОМ SOLAR-5» (рис. 3) [7], которое имеет стены, сплошные и вентилируемые оконные проемы, двускатную кровлю, солнечные коллекторы водяного отопления и солнечные фотоэлектрические панели, смонтированные на кровле здания. Скат кровли, обращенный на юг, выполнен двучастным, при этом его нижняя плоскость размещена под углом к горизонту от  $30^\circ$  до величины, определяемой выражением  $90 - \varphi^\circ$ , где  $\varphi$  – широта местности строительства здания. Так же, северный скат кровли выполнен двучастным, при этом его нижняя плоскость размещена под углом от  $12$  до  $26,5^\circ$  к горизонту, и выступает за плоскость наружных стен в виде козырька не более чем на четвертую часть их высоты.



солнечная защита (внешние жалюзи)

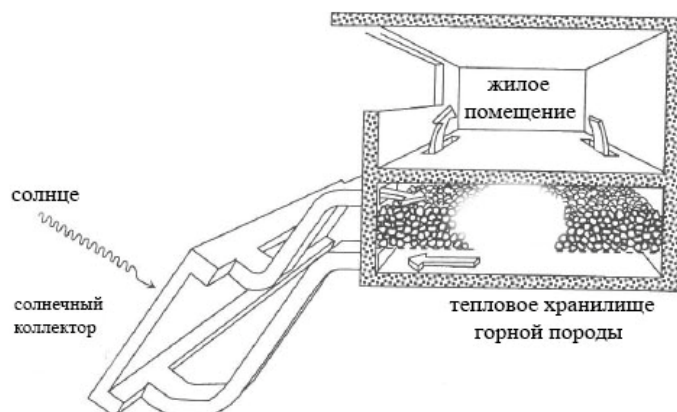
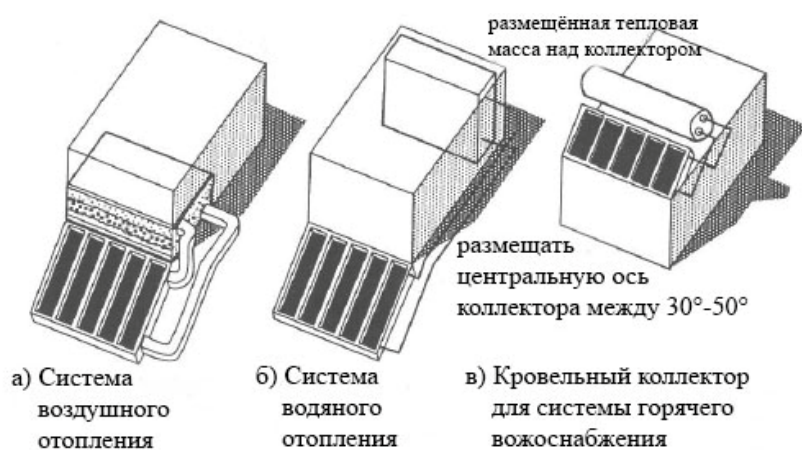
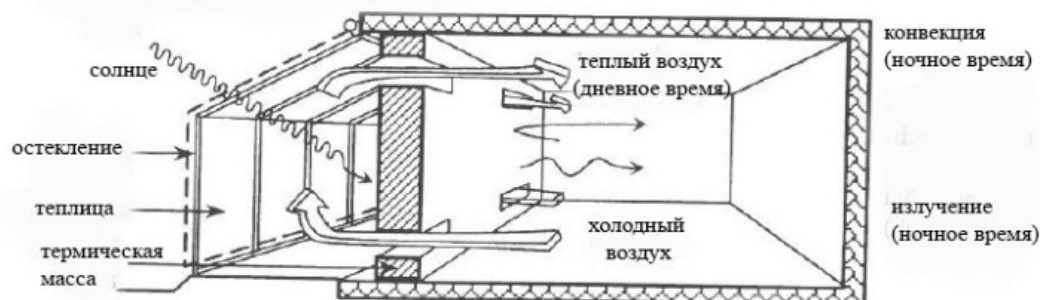


Рисунок 1. – Пассивные солнечные системы отопления здания с коллекторами при естественной циркуляции воздуха в пространстве между остеклением южного фасада и теплоаккумулирующей стеной здания [6]

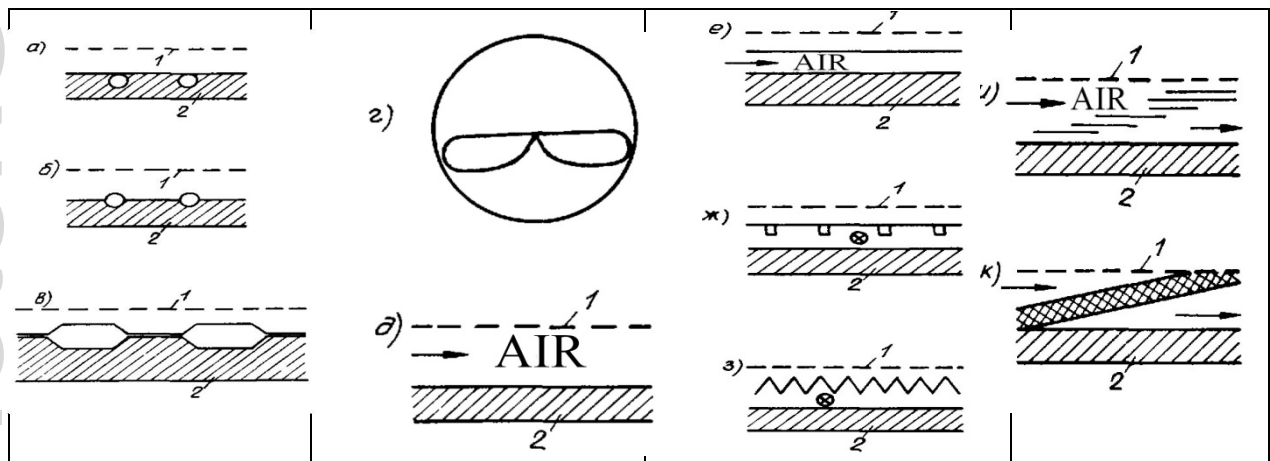


Рисунок 2. – Схема конструкций жидкостных (а–г) и воздушных (д–к) коллекторов солнечной энергии:  
1 – остекление; 2 – аккумулирующая поверхность

Использование такой модели энергоэффективного здания обеспечивает достижение эффекта энергосбережения при формировании комфортного теплового режима за счет дополнительных поступлений тепла от прямого солнечного обогрева и снижения тепловых потерь при ветровом воздействии зимой, а также естественной аэрации и затенения жилых помещений летом.

Описывались отечественные и зарубежные модели энергоэффективных зданий, выполненные для умеренного климатического пояса северного полушария [8, 9].

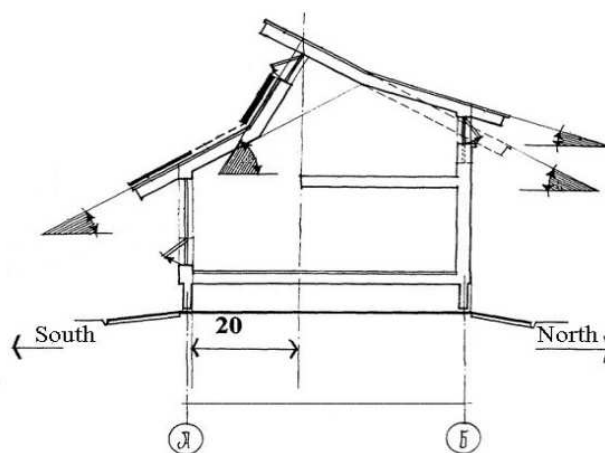


Рисунок 3. – Разрез индивидуального жилого дома «ЭКОДОМ SOLAR-5»

Нами приняты конструктивные особенности плоского воздушного коллектора солнечной энергии (КСЭ) для системы вентиляции культового здания русской православной церкви на рисунке 4 с учетом норм на проектирование инженерных систем [10]. Рассчитаны размеры плоского воздушного КСЭ и принята ширина щели для прохода воздуха 50 мм. Принята скорость движения воздуха в КСЭ 4 м/с. Кратность воздухообмена в здании церкви составляет не менее 30 м<sup>3</sup>/ч наружного воздуха на 1 человека [10]. Одновременное нахождение в церкви – 50 человек на площади молельного зала. Аналогичные системы КСЭ можно применять и для других гражданских зданий [4], в т.ч. возобновляемые источники энергии в системах вентиляции и отопления, теплоснабжения [5, рис. 16.1–16.7].

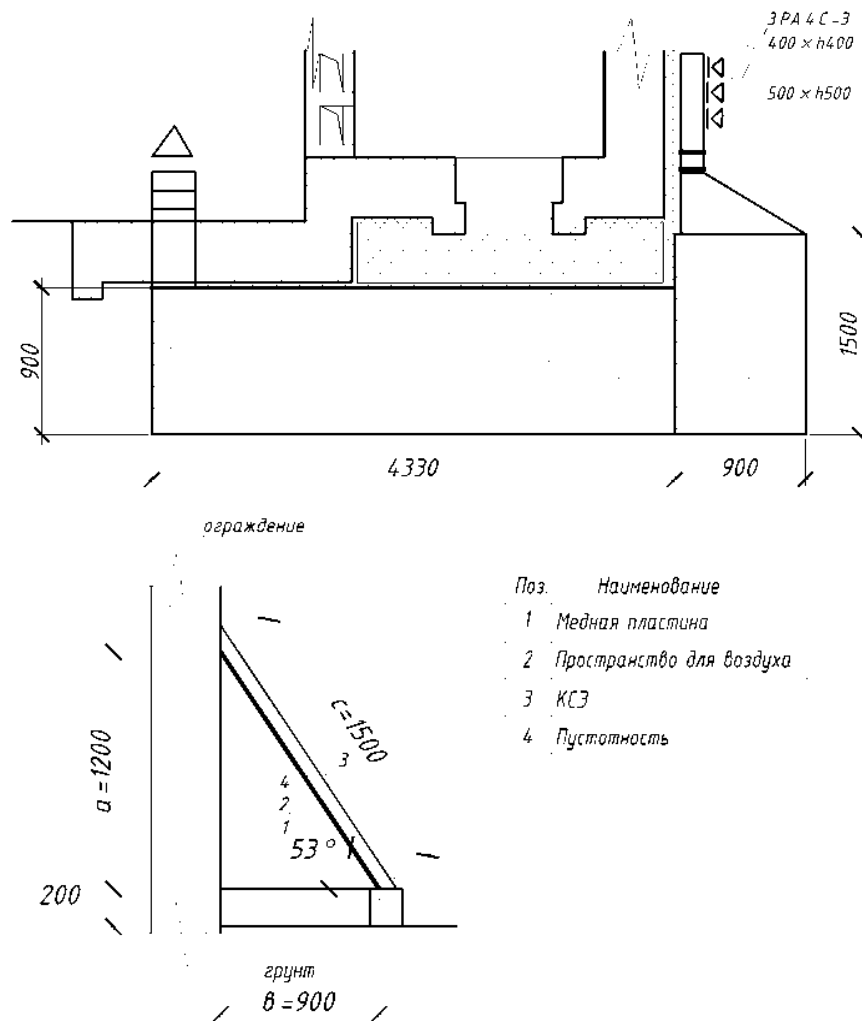


Рисунок 4. – Вид сверху и разрез плоского воздушного КСЭ расположенного у восточной и южной стен культового здания церкви

Забор воздуха в КСЭ осуществляется с восточной стороны здания церкви через наружные воздухозаборные решётки, которые установлены на воздуховоде, закреплённом на наружной стене здания на высоте не менее 2000 мм [11]. Высота до верха купола 12 м.

Предложенная нами схема и конструктивные размеры пассивного плоского воздушного КСЭ (рис. 4–6, 8) требуют размещения КСЭ под углом  $\beta$  с восточного и южного фасада здания церкви. Угол  $\beta$  равен широте местности (рис. 7) [5, п. 16.3]. Абсорбер, выполнен из пластин хорошо проводящего металла меди. Использовано неселективное стекло, которое не пропускает волны как светового, так и теплового и излучения. В отличие от плоского солнечного коллектора здесь нет трубок, воздух нагревается непосредственно при контакте с пластиной абсорбера. Для увеличения площади теплоотдачи абсорбер имеет ребристую форму или перфорацию. Коллектор должен быть хорошо изолирован со стороны стены здания, чтобы уменьшить тепловые потери. Циркуляция воздуха в КСЭ может быть как естественной, так и принудительной. В предложенной нами схеме механической вентиляции церкви предлагается установить утеплённый клапан, осевой вентилятор и шумоглушитель с внутренней стороны здания церкви после КСЭ, как показано на рисунках 4, 5.

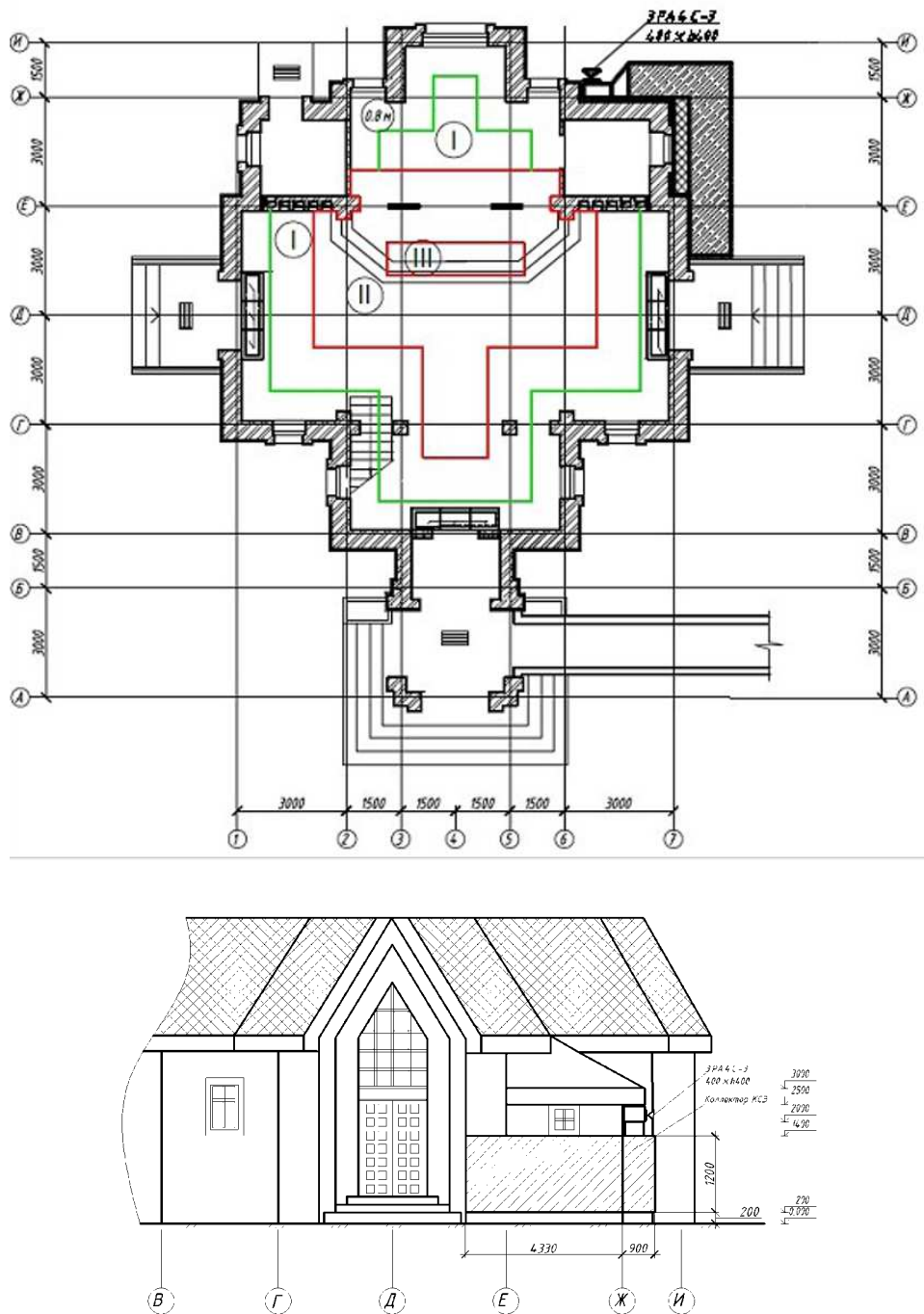


Рисунок 5. – План церкви со схемой размещения плоского воздушного пассивного КСЭ на восточном и южном фасадах здания и вид сбоку на КСЭ со стороны южного фасада

Для правильной организации воздухообмена в культовом здании (на примере церкви), а также с целью создания энергоэффективной системы отопления, нами предложено в традиционную схему системы отопления и запроектирован дополнительный горизонтальный стояк, который проложен по наружной стене на втором ярусе под куполом (можно прокладывать под окнами расположенными под куполом культового здания). Расчётная тепловая нагрузка верхнего горизонтального стояка принимается на 20 % больше расчётных тепловых потерь верхней части церкви с учётом тепловых потерь через купол и световые проёмы в нём, с учётом рекомендаций пункта 7.1.17 [4].

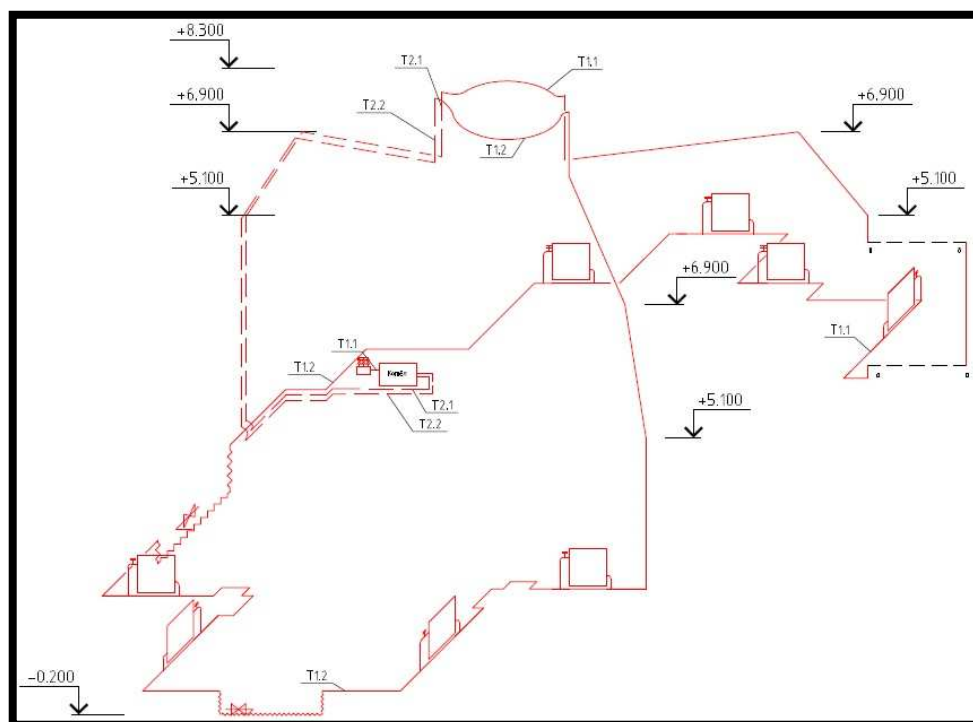
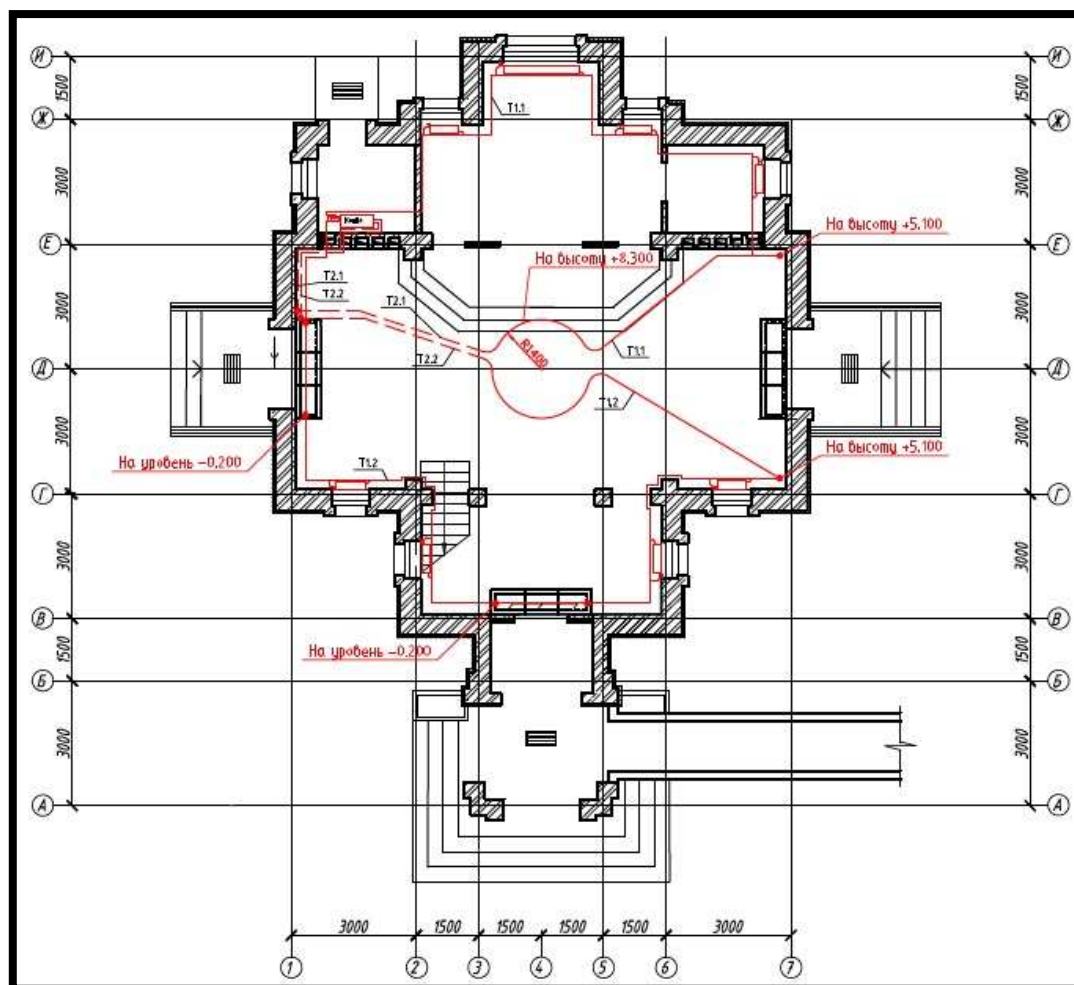


Рисунок 6. – План церкви с системой отопления и схема системы отопления церкви с размещением ветки второго яруса на высоте от +5,100 до +8,300 м



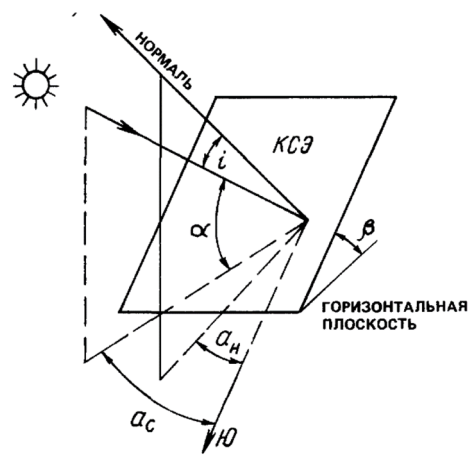


Рисунок 7. – Схема расположения плоского КСЭ [5, параграф 16.3]

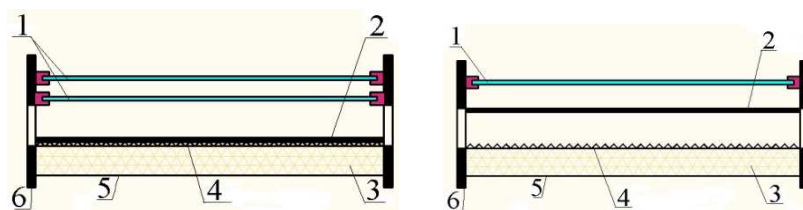


Рисунок 8. – Предлагаемые конструкции № 1 и № 2 плоского воздушного КСЭ:

- 1 – остекление; 2 – теплоаккумулирующая поверхность; 3 – утепление у наружной стены; 4 - абсорбер ребристой формы или с перфорацией; 5 – поверхность наружной стены

Обе конструкции коллекторов (рис. 7) являют достаточно простыми по конструкции и удобно монтируются из доступных материалов (рис. 4, 7). Диаметр воздуховода и конструкция вентиляционного перехода рассчитываются [11]. Нормы проектирования для культовых зданий в Российской Федерации отличаются от принятых в Республике Беларусь [12–14].

В результате проделанной работы нами получены следующие выводы по применению пассивных плоских воздушных КСЭ для систем вентиляции и отопления культовых зданий:

1. Использование плоского коллектора солнечной энергии для нагрева приточного воздуха является альтернативным способом обеспечения работы общеобменной системы вентиляции для рассеивания вредностей, выделяемых от людей, при сгорании свечей и лампад в культовом здании. Располагать КСЭ следует с восточной и южной сторон культового здания (рис. 4–6).

2. Для гражданских зданий для систем воздушного отопления в период с отрицательными температурами наружного воздуха необходим подогрев подаваемого наружного воздуха после КСЭ. Можно проектировать энергосберегающие системы напольного отопления с учётом рекомендаций [15].

3. Пассивный воздушный плоский КСЭ возможно рассматривать как альтернативу гелиосистемам с жидким теплоносителем. Для подогрева теплоносителя воды в системе водяного отопления можно также использовать КСЭ. Однако недостатком станет сложность осуществления подогрева воды за счёт энергии солнца из-за непостоянства поступления этой энергии в течение суток и месяца. Простой является схема, где использована солнечная энергия для системы воздушного отопления. В ночное время и пасмурную погоду для работы систем можно использовать теплоту, которая накапливается в аккумуляторах за солнечный световой день.

4. Сочетание энергии от КСЭ с энергией, полученной в теплоутилизаторе, которая позволит использовать тепло внутреннего удаляемого воздуха из культового здания, хотя перед использованием удаляемый воздух необходимо очистить от копоти. Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) позволит получить экономию тепловой энергии, получить энергосберегающий эффект, создать новые «зелёные» рабочие места [16, 2, 17]. Возможно применить КСЭ для подогрева воздуха в системах воздушного отопления или выполнять нагрев теплоносителя для систем водяного отопления за счёт электрической энергии, полученной в плоских полупроводниковых КСЭ, другие схемы использования ВИЭ.

5. Недостатком КСЭ является непостоянство солнечных дней в холодный и переходный период года для северных широт, и несовершенство систем аккумулирования уловленной солнечной энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Республики Беларусь о возобновляемых источниках энергии : принят 27.12.2010, № 204-3 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2010. – N 2/1756.
2. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года [Электронный ресурс] : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 11 дек. 2013 г., № 1066 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь.
3. Государственная программа «Энергосбережение» на 2016 – 2020 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 28.03.2016 г., № 248 : в ред. постановления Совета Министров Респ. Беларусь от 30.12.2016, №1128.
4. Системы отопления и вентиляции усадебных жилых домов. Правила проектирования : ТКП 45-4.02-74-2007 (02250). – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2008. – 36 с.
5. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 1. Отопление / под ред. И.Г. Старовойтова. – М. : Стройиздат, 1990. – 344 с.
6. Er. Bharat Raj Pahari. Passive Building Concepts Design / Er. Bharat Raj Pahari. – Kantipur Engineering College: Dhapakhel, Lalitpur, Nepal, 2002. – 196 с.
7. Энергоэффективное здание «Экодом Solar-5» : пат. 65926 RU, МПК51 U1 E04H14/00, E04H1/00 / П.А. Казанцев ; дата публ. 27.08.07.
8. Solararchitektur fur Europa/ Focus film. Astrid Schneider, Berlin, 1996., p.48-51: жилой дом «Nullenergiehaus-serienreif», Wietringen, Германия.
9. Энергоактивные здания. Одноквартирный жилой дом серии «П», полигон «Солнце» / под ред. Н.П. Селиванова. – М. : С/И. 1988. – С. 247–248.
10. Культовые здания и сооружения. Здания, сооружения и комплексы православных храмов. Правила проектирования : ТКП 45-3.02-83-2007. – Минск : М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2008. – 46 с.
11. Внутренние санитарно-технические устройства: Справочник проектировщика. В 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1 / В.Н. Богословский [и др.] ; под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. – Изд. 4-е. перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1992. – 319 с. : ил.
12. Храмы православные. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха : Стандарт АВОК-2-2004. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2004.
13. Кочев, А.Г. Микроклимат православных храмов : моногр. / А.Г. Кочев. – Н. Новгород : ННГАСУ, 2004. – 448 с.
14. Кронфельд, Я.Г. Принципы устройства систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, тепло- и холодоснабжения в зданиях культовой архитектуры / Я.Г. Кронфельд // Авок. – 2000. – № 1. – С. 7–19.
15. Покотилов, В.В. Пособие по расчёту систем отопления / В.В. Покотилов. – М. : HERZ Armaturen, 2006. – 144 с.
16. Инициативы для будущего, или как обеспечить переход к «зелёной» экономике // Беларускі час. – 2018. – 20 апр. – С. 3–5.
17. United Nations Conference on Sustainable Development or Rio+20.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ  
В КОНДЕНСАЦИОННЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРАХ  
НА ПРИМЕРЕ КОТЕЛЬНОЙ «5-Й ПОЛК» Г. ВИТЕБСКА

Т.И. Королёва, В.А. Зафатаев

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: kafedratgsv@mail.ru

*С целью уменьшения теплового и химического загрязнения атмосферы, а также решения проблем энергоресурсосбережения при эксплуатации котельных установок предлагается применение в трактах уходящих дымовых газов конденсационных теплоутилизаторов рекуперативного типа, в которых полезно используется явная и скрытая теплота дымовых газов, а также улавливаются продукты сгорания топлива. Проанализированы термодинамические параметры работы действующего утилизатора теплоты на котельной «5-й полк» в г. Витебске и предложен вариант оптимизации его работы.*

*Ключевые слова: теплота; утилизация; конденсация; теплопередача; потери давления; условное топливо.*

THERMODYNAMIC SUBSTANTIATION OF SMOKE GASES HEAT RECOVERY  
IN CONDENSATIONAL HEAT-UTILIZERS LOCATED AT THE BOILER PLANT  
"5<sup>th</sup> REGIMENT" IN VITEBSK TOWN

T. Karaliova, V. Zafatayeu

Polotsk State University, Belarus

email: kafedratgsv@mail.ru

*In order to reduce the thermal and chemical pollution of the atmosphere, as well as to solve the problems of energy and resource saving in boiler plants, it is proposed to use recuperative heat recovery heat-utilizers in the flue gas outlets, in which the explicit and latent heat of flue gases is used and the combustion products of the fuel are trapped out. Thermodynamic parameters of the operating heat-utilizer located at the boiler plant "5th regiment" in Vitebsk have been analyzed and a variant of its optimization has been offered.*

*Keywords: heat; recycling; heat exchanger; condensation; heat transfer; pressure loss; nominal fuel.*

**Введение.** Несовершенство технологии использования топливно-энергетических ресурсов (далее – ТЭР) в коммунальной сфере негативным образом сказывается на экономическом развитии страны, повышает энергоёмкость ВВП, снижает конкурентоспособность продукции и услуг. При этом для компенсации необратимых потерь в технологических процессах возникает необходимость увеличения потребления ТЭР, что вызывает рост себестоимости выработки тепловой и электрической энергии, увеличение выбросов парниковых газов, приводит к тепловому и химическому загрязнению атмосферы. Охлаждение уходящих

дымовых газов, и соответственно полезное использование их теплового потенциала в существующих технологиях выработки тепловой и электрической энергии позволяет снизить себестоимость выработки энергии, повысить тепловую эффективность процессов преобразования энергии и ослабить антропогенное воздействие на атмосферу.

**Основная часть.** В котельной «5-й полк» г. Витебска установлены два котлоагрегата типа КВ-РМ-2,5, работающих на щепе. Газовый тракт каждого котлоагрегата оснащён конденсационным теплоутилизатором ТК рекуперативного типа. Утилизация теплоты дымовых газов происходит в рекуперативном кожухотрубном теплообменнике, установленном вертикально. Дымососы подают дымовые газы в трубное пространство теплообменников по схеме «сверху-вниз», а в межтрубном пространстве проходит подогреваемая сетевая вода.

Конденсационные теплоутилизаторы типа ТК выпускаются Витебским дочерним унитарным коммунальным производственным предприятием котельных и тепловых сетей ВПКИТС.

Выполнено сравнение параметров работы теплоутилизатора (далее – ТУ) согласно режимной карте котла КВ-РМ-2,5 и параметров, полученным расчётным путём.

Произведён тепловой и гидравлический расчёт ТУ. Характерной зоной (интервалом) ТУ является микротеплообменник, ограниченный двумя сегментными перегородками. Температуры теплоносителей усреднены по характерным зонам. Коэффициенты теплоотдачи, теплопередачи усреднены в зонах без выпадения конденсата и в зонах с выпадением конденсата из потока дымовых газов. Аэродинамическое и гидравлическое сопротивление рассчитано для ТУ в целом.

Схема теплообмена дымовых газов и сетевой воды показана на рис. 1.

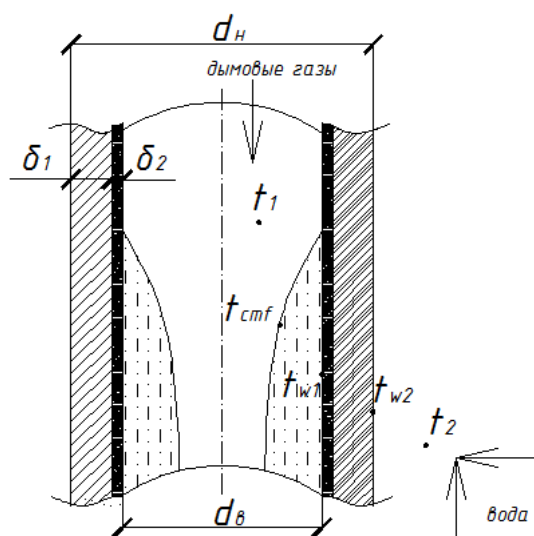


Рисунок 1. – Схема теплообмена дымовых газов и сетевой воды

$d_v, d_n$  – соответственно внутренний и наружный диаметр трубок теплообменника, мм;  
 $\delta_1, \delta_2$  – соответственно толщина стальной стенки трубы и сажевых отложений, мм;  
 $t_1, t_2$  – соответственно определяющие температуры дымовых газов и сетевой воды, °С;  
 $t_{cmf}$  – температура на границе раздела «газ – конденсат», °С;  
 $t_{w1}, t_{w2}$  – соответственно температуры на внутренней и на наружной поверхностях трубок, °С.

Тепловой расчёт ТУ заключался в нахождении конечных температур дымовых газов  $t_1''$  и воды  $t_2''$  и сравнении их с температурами согласно данных режимной карты котлоагрегата при четырёх вариантах его нагрузки. В ходе расчёта методом последовательных приближений [1, 2, 4] определялись температуры  $t_{ctf}$ ,  $t_{w1}$ ,  $t_{w2}$ , а также местоположение интервала с началом конденсации водяного пара из дымовых газов.

В таблице 1 представлены параметры работы котлоагрегата с ТУ, взятые из режимной карты котла, и полученные расчётным путём. В действующей установке на котельной применяется теплообменник с длиной труб, равной 7 м. Для улучшения технико-экономических показателей процесса производства тепловой энергии предложено увеличить длину труб теплообменника до 9 м.

Температуры  $t_1''$  и  $t_2''$ , представленные в таблице 1 для ТУ с 7-метровым теплообменником, получены по итогам теплового расчёта с отклонением не более  $\pm 0,3$  °C от данных режимной карты котлоагрегата.

Таблица 1. – Параметры работы котлоагрегата с теплоутилизатором (ТУ)

		7-метровый ТУ				9-метровый ТУ			
Нагрузка котлоагрегата		25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
Начальная температура дымовых газов, °C	$t_1'$	85,0	94,0	106,0	118,0	85,0	94,0	106,0	118,0
Конечная температура дымовых газов, °C	$t_1''$	45,0	47,2	49,9	53,7	45,1	46,6	49,0	51,5
Начальная температура сетевой воды, °C	$t_2'$	44,0	44,0	46,0	47,0	44,0	44,0	46,0	47,0
Конечная температура сетевой воды, °C	$t_2''$	49,0	50,4	54,2	53,6	50,7	52,3	56,4	55,0
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	$L_2$	38,40	34,55	30,04	36,46	38,40	34,55	30,04	36,46

На рисунках 2, 3 представлено сравнение температур  $t_1''$  и  $t_2''$  для действующей установки с 7-метровым теплообменником, и для предлагаемого установки с 9-метровым теплообменником.

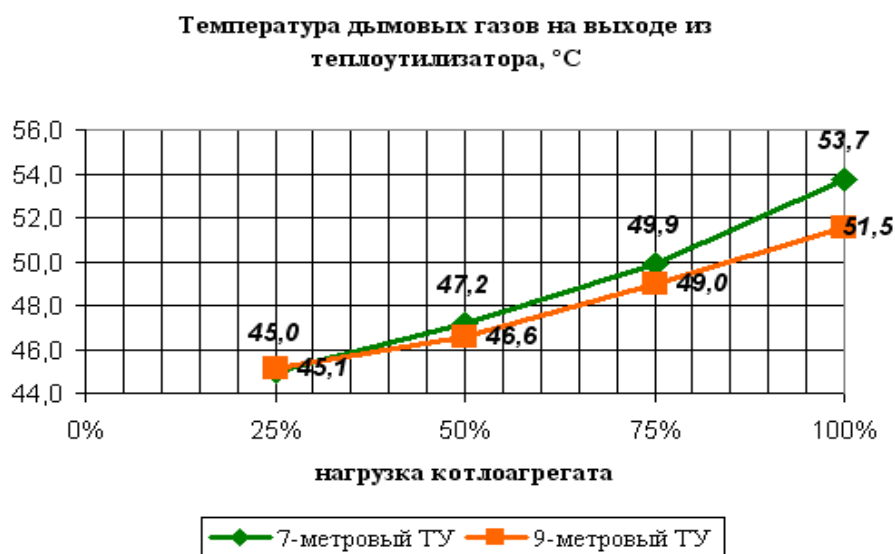


Рисунок 2. – Температуры дымовых газов  $t_1''$  на выходе из ТУ

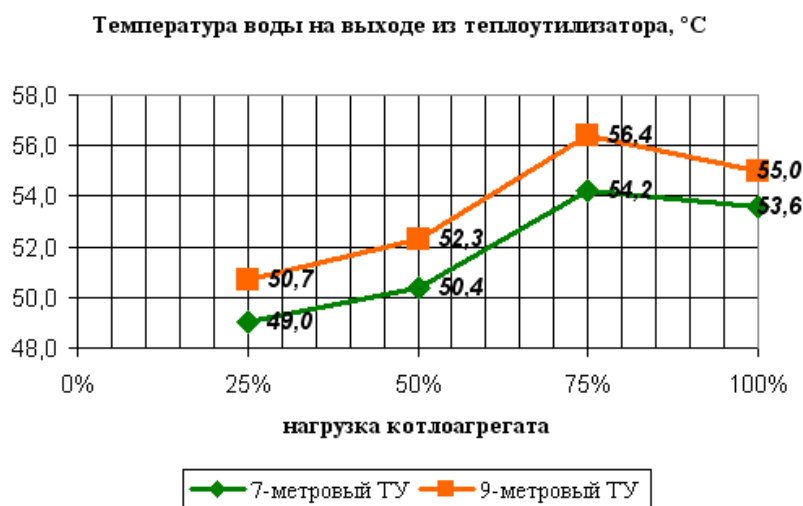


Рисунок 3. – Температуры сетевой воды  $t_2''$  на выходе из ТУ

По рис. 2 и 3 видно, что в 9-метровом теплообменнике по сравнению с 7-метровым можно дополнительно охладить газы 0,6-2,2 °С, а сетевую воду дополнительно подогреть на 1,4-2,2 °С. С учётом того, что сетевая вода согласно режимной карте подогревается в ТУ на 4-6 °С, дополнительные 2 °С свидетельствуют об увеличении тепловой производительности ТУ на 30%.

На рисунке 4 представлено изменение коэффициента теплопередачи ТУ в зависимости от режима нагрузки котлоагрегата.

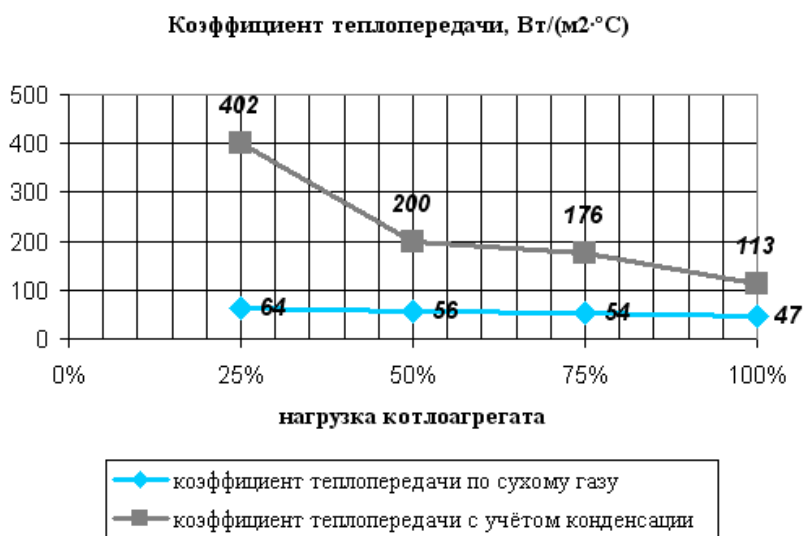


Рисунок 4. – Коэффициент теплопередачи по интервалам без выпадения конденсата и с выпадением конденсата в трубах теплообменника

Коэффициенты теплопередачи для действующей и для предлагаемой установки при их сравнении в соответствующем режиме нагрузки котлоагрегата существенно не изменяются, и могут быть приняты постоянными для 7-метрового и 9-метрового теплообменника. Коэффициент теплопередачи для интервалов ТУ с выпадением конденсата в 2,4-6,3 °С больше, чем для интервалов без выпадения конденсата. При максимальной нагрузке котлоагрегата интенсивность теплопередачи снижается в 1,6-3,6 раз относительно остальных режимов загрузки.

На рисунках 5, 6 представлены результаты гидравлических расчётов газового и водяного трактов ТУ.

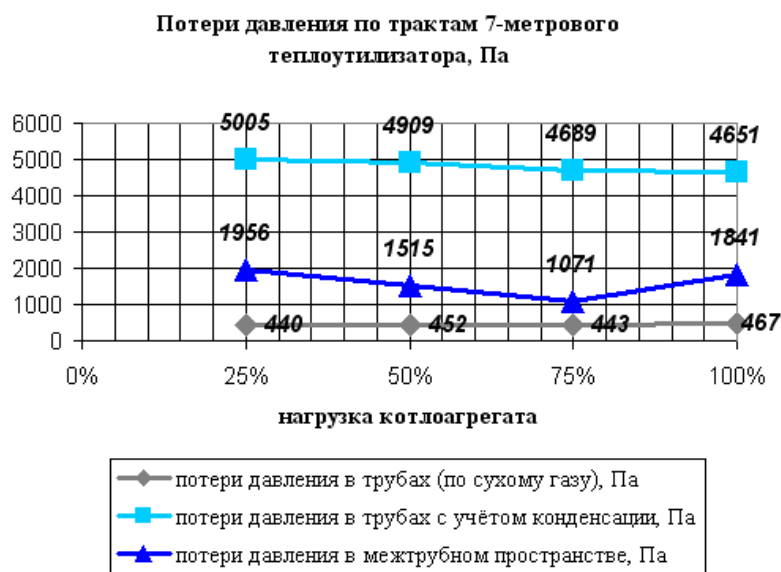


Рисунок 7. – Потери давления по трактам ТУ с 7-метровым теплообменником

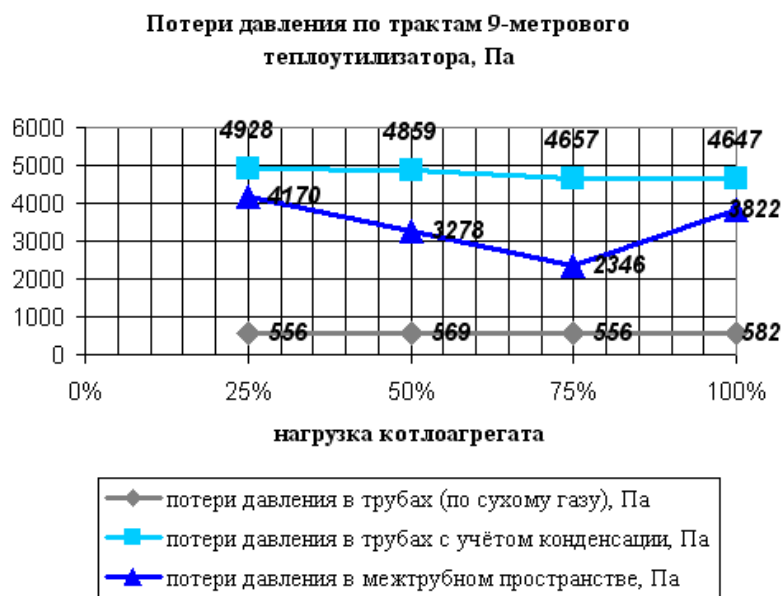


Рисунок 8. – Потери давления по трактам ТУ с 9-метровым теплообменником

Для 7-метрового теплообменника потери давления в интервалах с выпадением конденсата их дымовых газов в 10-11 раз больше, чем в интервалах без выпадения конденсата, для 9-метрового теплообменника – в 8-9 раз больше. Дополнительные 2 м длины труб у предлагаемой установки увеличат потери давления по газовому тракту на 110-120 Па относительно действующей установки. Потери давления в межтрубном пространстве 9-метрового теплообменника в 2,2 раза больше, чем для 7-метрового, поскольку согласно ГОСТ 15118-79, [3], [5] расстояние между сегментными перегородками принимается в зависимости от диаметра корпуса теплообменника, диаметра труб и шага их установки в трубной решётке. В действующей установке расстояние между сегментными перегородками должно составлять 250 мм, а не 400 мм.

На рисунке 9 показано изменение тепловой производительности действующего и предлагаемого ТУ в зависимости от режима нагрузки котлоагрегата.

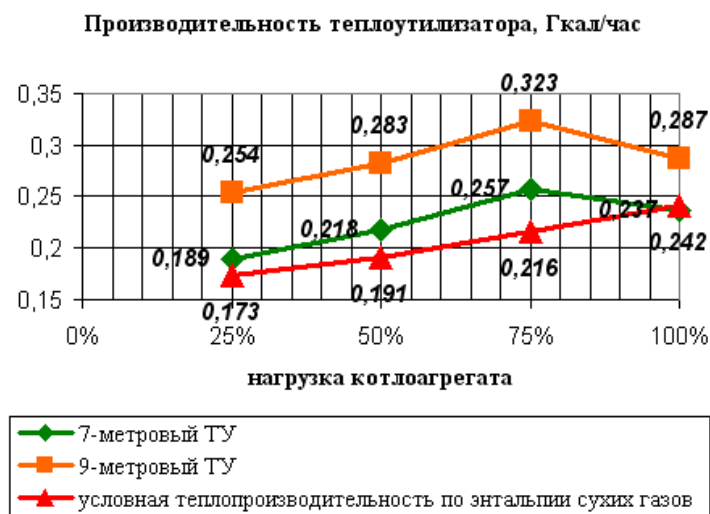


Рисунок 9. – Тепловая производительность теплоутилизаторов

Тепловая производительность ТУ с 9-метровым теплообменником на 21-34% выше, чем для ТУ с 7-метровым теплообменником. Кроме того, в режиме максимальной нагрузки котлоагрегата тепловой эффект от конденсации в действующей установке минимален по причине того, что проходящие в трубках теплообменника дымовые газы не успевают охладиться до температуры точки росы, и конденсация, с высокой степенью вероятности, происходит при выходе газов из трубного пространства в расширяющуюся часть бака сбора конденсата. Нарращивание длины труб теплообменника на 2 м позволит полезно использовать теплоту конденсации и в максимальном режиме нагрузки котлоагрегата.

Соотношение количества интервалов теплообменника с конденсацией водяных паров и интервалов без конденсации для действующего и предлагаемого ТУ представлено на рисунках 10, 11.

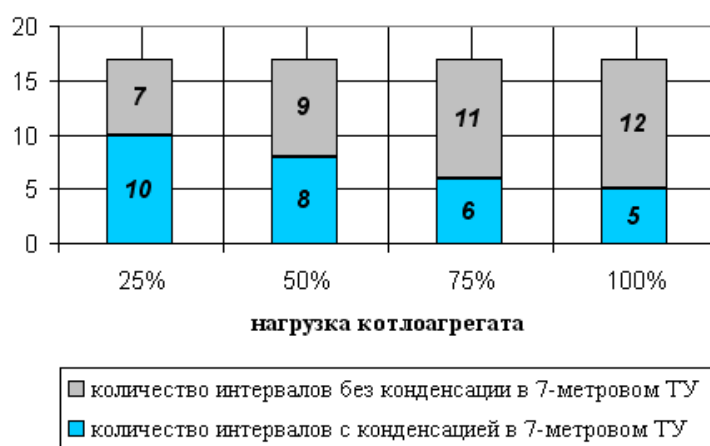


Рисунок 10. – Распределение интервалов с различными режимами теплообмена в зависимости от тепловой нагрузки котлоагрегата в действующем ТУ

Чем выше тепловая нагрузка котлоагрегата, тем меньше длина конденсационной части теплообменника в ТУ.



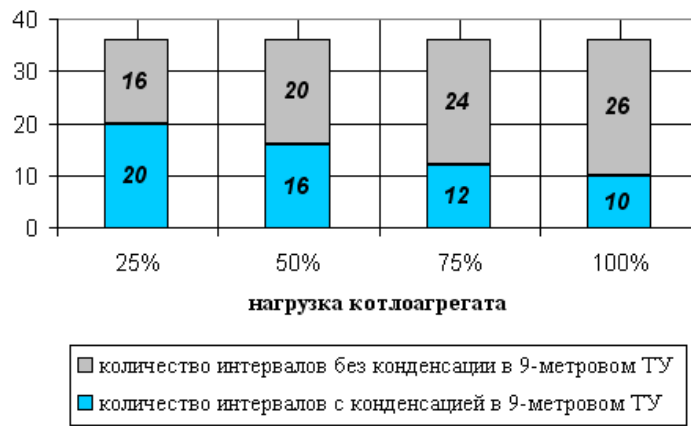


Рисунок 11. – Распределение интервалов с различными режимами теплообмена в зависимости от тепловой нагрузки котлоагрегата в предлагаемом ТУ

На рисунках 12, 13 показана экономия теплоты и затраты на электроэнергию для работы ТУ в выражении условного топлива.

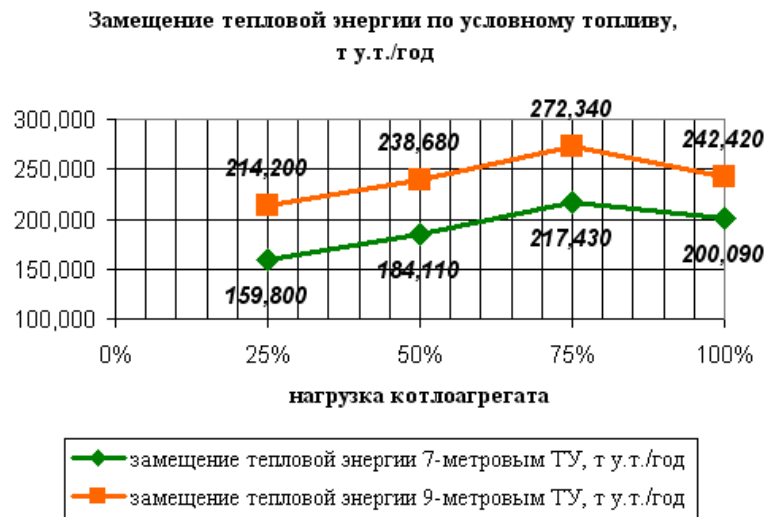


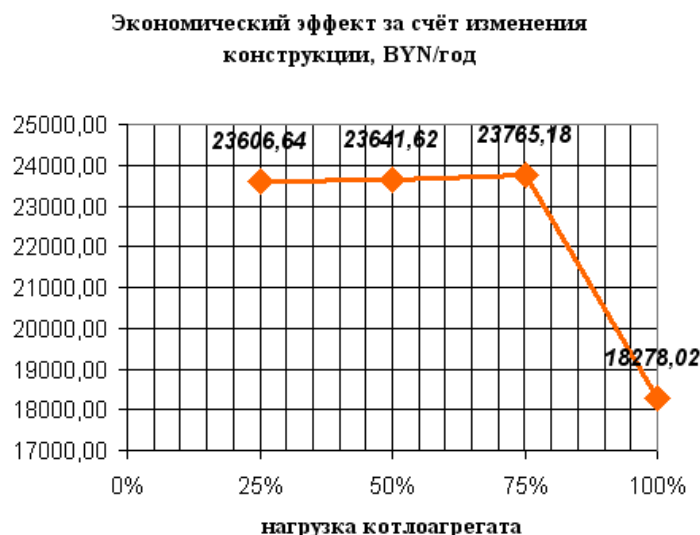
Рисунок 12. – Замещение тепловой энергии в выражении условного топлива за счёт эксплуатации ТУ



Рисунок 13. – Расход электроэнергии в выражении условного топлива на работу ТУ

Экономия условного топлива за счёт включения в газовый тракт ТУ с 9-метровым теплообменником на 21–34% выше, чем в ТУ с 7-метровым теплообменником. При этом затраты на электроэнергию по условному топливу для прокачивания теплоносителей через ТУ с 9-метровым теплообменником возрастают на 1,1–2,5%. В целом экономия условного топлива за счёт утилизации теплоты превышает затраты на электроэнергию в 10,5–14,1 раз для предлагаемой установки, и в 7,9–11,4 раз для действующей установки.

На рисунке 14 представлены результаты расчёта экономического эффекта, получаемого за счёт увеличения длины труб теплообменника на 2 м.



**Рисунок 14. – Экономический эффект за счёт замены действующего ТУ на ТУ с увеличенной длиной труб в теплообменнике**

Экономический эффект за счёт замены действующей установки с 7-метровым теплообменником на установку с 9-метровым теплообменником дает положительный экономический эффект. Однако в максимальном режиме нагрузки котлоагрегата этот эффект будет ниже на 30%, чем для остальных режимов работы котлоагрегата. Металлоёмкость конструкции теплоутилизатора за счёт увеличения длины труб теплообменника увеличится в 1,36 раза, или примерно на 800 кг.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонный, А.Н. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения : справ. / А.Н. Бессонный, Г.А. Дрейцер, В.Б. Кунтыш. – СПб. : Недра, 1996. – 512 с.
2. Лебедев, П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки / П.Д. Лебедев. – М. : Энергия, 1972. – 320 с.
3. Логинов, А.В. Выбор конструкции экономически целесообразного режима эксплуатации теплообменных аппаратов : учеб. пособие / А.В. Логинов. – Воронеж : ВТИ, 1991. – 80 с.
4. Маньковский, О.Н. Теплообменная аппаратура химических производств / О.Н. Маньковский, А. Р. Толчинский, М. В. Александров. – Л. : Химия, 1976. – 369 с.
5. Савельев, Н.И. Расчёт и проектирование кожухотрубных теплообменных аппаратов : учеб. пособие / Н.И. Савельев, П.М. Лукин. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – 80 с.

## Секция VI

### ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО АРХИТЕКТУРНОГО И СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 378:004

#### РЕАЛИЗАЦИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПОДХОДОВ В ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРОВ-СТРОИТЕЛЕЙ

*А.В. Василевский, Н.Г. Грек*

Полоцкий государственный университет, Беларусь

e-mail: a.vasilevsky@psu.by, n.myshko@psu.by

*Рассматриваются актуальные проблемы реализации инновационных подходов в подготовке инженеров-строителей. В качестве примера приведена система инновационных форм и методов, используемая в процессе обучения по дисциплинам, связанным с использованием информационных технологий, на инженерно-строительном факультете Полоцкого государственного университета.*

*Ключевые слова: образовательный процесс; инновация; инновации в образовании; инновационные подходы; инновационные технологии.*

#### IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE APPROACHES IN THE TRAINING OF CIVIL ENGINEERS

*A. Vasilevsky, N. Grek*

Polotsk State University, Belarus

e-mail: a.vasilevsky@psu.by, n.myshko@psu.by

*This article discusses current problems of implementing innovative approaches in the education of construction engineers. As an example, the article discusses the innovative system of methods that is used to teach information technology at the Construction Engineering Department of Polotsk State University.*

*Keywords: educational process; innovation; innovations in education; innovative approaches; innovative technologies.*

В настоящее время реализация инновационных подходов в высшем образовании является главным условием успешности подготовки специалистов и совершенствования всей педагогической работы современных учебных заведений. И важно помнить при этом, что инновационные изменения в учебном процессе не должны сводиться к простому приращению некоторого набора отдельных форм и методов обучения; эти инновационные подходы «должны быть системными и охватывать все аспекты учебно-воспитательной работы при подготовке будущих специалистов» [2, с. 69].

В то же время, не следует воспринимать инновационные подходы в педагогике высшей школы как нечто неподвижное, раз и навсегда данное, «не следует рассматривать инновационную составляющую образовательного процесса как заранее заданный алгоритм инновационной деятельности» [1, с. 93]. В реализации инновационных методов и форм, таким образом, требуется определённая гибкость, мобильность, позволяющая при необходимости менять формы и подходы прямо в процессе обучения. Конечно, это до из-

вестной степени входит в противоречие с распространёнными требованиями чёткой и жёсткой фиксации каждого шага всех субъектов учебного процесса: на данном занятии мы говорим такие-то слова, решаем такие-то задачи, и вся деятельность оказывается расписана на весь период обучения, без возможности оперативного внесения изменений.

Представляется, что данную проблему можно решить только путём коренного изменения подхода к обязательному документационному оформлению педагогического процесса. В частности, вместо закрепления предельно конкретизированных форм учебных ситуаций (подразумеваются не только формы обучения, но и формы диагностики), целесообразно формулирование «целостной концепции с теоретическим и методологическим обоснованием, созданием инновационной дидактической технологии с учётом специфики УВО, структуры специальностей и специализаций» [1, с. 93]. В результате такого подхода и сам педагогический труд может стать творческим и подлинно инновационным. Тем не менее, даже в настоящих условиях имеются определённые возможности по реализации инновационных подходов при подготовке специалистов инженерного профиля, и, в частности, в области архитектуры и строительства.

Рассмотрим особенности реализации этих подходов в практике обучения студентов инженерно-строительного факультета Полоцкого государственного университета, в частности, на примере ряда дисциплин, непосредственно связанных с освоением информационных технологий. Речь идёт о дисциплинах «Информатика», «Информатика и компьютерное проектирование», «Информационные технологии в управлении недвижимостью» и «Основы автоматизации в строительстве», изучаемые студентами специальностей «Промышленное и гражданское строительство», «Архитектура» и «Экспертиза, управление недвижимостью».

В качестве основы используемых инновационных форм и методов принята культурно-праксиологическая концепция, разработанная доктором педагогических наук профессором И.И. Цыркуном. Несмотря на то, что указанная концепция формулировалась как предназначенная для инновационной подготовки именно педагогических работников, она с успехом может применяться и для подготовки инженерных кадров, в частности, принцип культурно-праксиологической генерализации и принцип взаимодополнительности априорно-информационного и апостериорно-деятельностного путей интериоризации опыта [3].

Вкратце обозначим конкретные формы и методы реализации педагогических инновационных подходов:

*применяемые для преподавания дисциплины в целом (априорно-информативное обучение):*

- формирование информационно насыщенной образовательной среды (предполагает использование в процессе выполнения практических работ, в самостоятельных занятиях и для подготовки к лекционным занятиям, специально сформированной и наполняемой медиатеки факультета, а также ресурсов репозитория ПГУ);
- технология модульного обучения (учебный материал разбит на модули, вследствие чего обеспечивается более качественное овладение материалом, полученные теоретические знания углубляются и обогащаются в процессе выполнения связанных с ними практических работ);
- использование средств мультимедиа (лекционный курс, включающий мультимедийные презентации и видеофайлы, проводится с использованием мультимедийного проектора);

*применяемые на практических и лабораторных занятиях (апостериорно-деятельностное обучение):*

- технология проблемного обучения (учебные задачи формируются таким образом, чтобы они моделировали реальный творческий процесс за счёт создания проблемной ситуации и управления поиском решения проблемы);

- интерактивный метод обучения (в процессе решения практических задач имеет место не только диалог студентов с преподавателем, но и активное взаимодействие студентов между собой, причём активность студентов доминирует).

Конечно, приведённой здесь системой форм и методов, базирующихся на вышеназванных концепциях, не исчерпывается потенциал инновационного развития педагогического процесса подготовки инженерных кадров в области архитектуры и строительства. Необходима дальнейшая работа по повышению качества, по разработке и применению новых подходов, и, в качестве основной задачи-максимум, формированию «инновационной культуры преподавателя и студента» [1, с. 93].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тарантей, В.П. Инновации в высшем образовании: методологические и теоретические подходы и их практическая реализация / В.П. Тарантей // Журн. Белорус. гос. ун-та. Журналистика. Педагогика. – 2017. – № 2. – С. 89–94.

2. Трофименко, А.С. Инновационные методы обучения в высшем образовании [Электронный ресурс] / А.С. Трофименко // SCI-ARTICLE.RU. – 2014. – № 13. – С. 68–79. – Режим доступа: [http://sci-article.ru/number/09\\_2014.pdf](http://sci-article.ru/number/09_2014.pdf).

3. Цыркун, И.И. Культурно-праксиологическая концепция специальной инновационной подготовки педагога [Электронный ресурс] / И.И. Цыркун, Е.И. Карпович // Репозиторий БГПУ / ФАКУЛЬТЕТЫ. ИНСТИТУТЫ / Факультет социально-педагогических технологий / Учебные издания факультета социально-педагогических технологий. – Режим доступа: <http://elib.bspu.by/handle/doc/24848>.

## ПРОБЛЕМЫ ПРЕПОДАВАНИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН НА СТРОИТЕЛЬНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЯХ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А.А. Воробьева, М.А. Скрабатун

Полоцкий государственный университет, Беларусь

e-mail: a.vorobyeva@pdu.by, m.skrabatun@pdu.by

*Проведен анализ знаний, навыков и умений, которыми должен овладеть студент получая квалификацию инженер. Рассмотрено распределение учебного времени между аудиторной работой и самостоятельным изучением предмета “Начертательная геометрия, инженерная и машинная графика”. Обозначены проблемы преподавания данного курса на строительных специальностях, а также предложена модель преподавания данного предмета в соответствии с концепцией информатизации системы образования Республики Беларусь на период до 2020 года.*

*Ключевые слова: самостоятельная работа, графические дисциплины, компьютеризация учебного процесса.*

A. Vorobyeva, M. Skrabatun

Polotsk State University, Belarus

e-mail: a.vorobyeva@pdu.by, m.skrabatun@pdu.by

## PROBLEMS OF TEACHING OF GRAPHIC DISCIPLINES IN THE CONSTRUCTION PROFESSIONS AND POSSIBLE WAYS OF THEIR SOLUTION

*In this article the analysis of knowledge, skills and abilities which the student has to master receiving qualification the engineer is carried out. The author considers the distribution of teaching time between classroom work and independent study of the subject “descriptive geometry, engineering and computer graphics”. The problems of teaching this course in construction specialties, as well as a model of teaching this subject in accordance with the concept of Informatization of the education system of the Republic of Belarus for the period up to 2020 are outlined.*

*Keywords: independent work, graphic disciplines, computerization of educational process.*

На современном этапе очень актуальной проблемой становится качество образовательного процесса, вызванное стремительным развитием общества, которое несет в себе изменения во всех сферах жизни. Все это приводит к необходимости обеспечения доступных качественных образовательных ресурсов и услуг, использование которых позволит повысить интерес у студентов к получению знаний, как в учреждениях образования, так и в домашних условиях, а также непрерывному самообразованию путем современных информационных технологий.

Условия, обеспечивающие реализацию основных идей информатизации в образовательном процессе по графическим дисциплинам, с одной стороны определяются [1]: мотивацией учителей и преподавателей, к внедрению новых информационных технологий в урочную и внеурочную деятельность, и их технической подготовленностью; технической оснащенностью необходимым оборудованием, а также доступом в Интернет; наличием специалистов и/или сервисных служб для технической поддержки и оказания консульта-

тивной помощи в эксплуатации компьютерной техники; методическим оснащением процесса использования средств информационных технологий в учебном процессе.

С другой стороны определяются диалектикой познания, состоящей из [2]: способности студентов выступать самостоятельными субъектами творчества, а не быть лишь объектом целенаправленного манипулирования со стороны педагога и учебного заведения; целостности личности, рассматриваемой не только со стороны познавательной деятельности, но и повседневной практики жизнедеятельности, системы основополагающих общественных ценностей; ориентации учебно-познавательного процесса на творчество, а не результат усвоения соответствующих разделов предмета, которые будут в дальнейшем необходимы для функциональной деятельности.

Задачи профессиональной деятельности и компетенции, которыми должен овладеть квалифицированный специалист после изучения графических дисциплин прописаны в образовательных стандартах. Графические дисциплины изучают, такие специальности как 1-70 02 71 «Промышленное и гражданское строительство», 1-70 03 01 «Автомобильные дороги, 1-70 04 71 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна», 1-70 04 02 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов», 1-69 01 01 «Архитектура» и другие.

Одним словом, будущий инженер (инженер, инженер-строитель, инженер-механик, архитектор) должен знать основные способы проектирования как новых деталей и сооружений, так и создания чертежей и проектной документации существующих объектов, их реконструкции и модернизации, уметь их читать и воспроизводить. Для этого и необходимо изучение такого предмета, как «Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика».

<i>В результате изучения учебной дисциплины студент должен :</i>		
ЗНАТЬ	УМЕТЬ	ВЛАДЕТЬ
<ul style="list-style-type: none"> <li>• методы проецирования в заданных системах плоскости проекции точки, промой, плоскости и поверхности;</li> <li>• признаки взаимного расположения и способы задания геометрических фигур и тел на чертеже;</li> <li>• основные принципы построения пересечения фигур и определения натуральной величины;</li> <li>• аппарат построения перспективы, аксонометрии, развертки;</li> <li>• алгоритмы построения границ земляных работ.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• выполнять на чертеже основные изображения геометрических фигур и тел;</li> <li>• выполнять аксонометрические изображения предметов;</li> <li>• читать чертежи.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• методами представления и чтения чертежей;</li> <li>• методами использования компьютерных технологий для построения чертежей;</li> </ul>

Важной частью в изучении данной специальности становится сама Начертательная геометрия, так как она знакомит студентов с основами проецирования предметов на плоскость, их взаимосвязи, учит способам графического и аналитического решения различных геометрических и метрических задач, способами преобразования и исследования геометрических тел, учит выполнять и "читать" чертежи, и что не мало важно – способствует развитию пространственного мышления.

В таблице 1 указаны основные темы начертательной геометрии, прописанные в образовательных стандартах, которые должны изучить студенты той или иной специальности, а также распределение аудиторных часов и самостоятельной работы.

Таблица 1

Специальности	1 – 69 01 01	1 – 70 02 01	1 – 70 05 01	1 – 70 03 01	1 – 70 05 01	1 – 70 04 02	1 – 70 04 03	1 – 36 07 01	1 – 36 01 06
<b>Темы</b>									
- методы проецирования	+	+	+	+	+	+	+	+	+
- основные свойства системы координат и плоскостей проекции, эпюр монжа	+	+	+	+	+	+	+	+	+
- проекции геометрических фигур	+	+	+	+	+	+	+	+	+
- теорема о проекциях прямого угла	+	+	+	+			+		
- способы преобразования чертежа		+	+	+	+	+	+	+	+
- плоскости, поверхности и способы их задания на чертеже	+	+	+	+	+	+	+	+	+
- взаимное расположение прямой, плоскости и нескольких плоскостей	+	+	+	+	+	+	+	+	+
- метрические и позиционные задачи		+	+	+	+		+		
- пересечение фигур и поверхностей геометрических тел	+	+	+	+	+	+	+		+
- плоскости касательные к поверхности	+								
- развёртка геометрических тел		+	+	+	+	+	+	+	+
- принципы и способы построения теней	+	+	+	+			+		
- аксонометрические проекции	+	+	+	+	+	+	+	+	+
- перспектива	+	+	+	+			+		
- проекции с числовыми отметками		+	+	+			+		
<b>Часы, отводимые на изучения предмета</b>									
Общее количество	170	286	260	274	240	299	280	274	283
Аудиторные занятия	102	154	136	136	120	153	136	142	153
Самостоятельная работа	68	132	124	138	120	146	144	132	130
<b>Процент часов, отводимый на самостоятельную работу</b>									
	35%	46%	47%	50%	50%	49%	52%	48%	46%

Из приведенных данных видно, что в условиях современного образования, академические часы на изучение предметов сокращают, в том числе происходит перераспределение часов между аудиторными и самостоятельными. Это связано со всеобщей информатизацией обучения.

В данный момент часы, отводимые на изучение предмета путем самостоятельной работы, составляют от 35% до 55%. Поэтому основной целью информатизации системы образования Республики Беларусь на период до 2020г., является создание для населения равных возможностей получения качественных образовательных услуг на уровне современных требований национальных и международных стандартов вне зависимости от места проживания и обучения с использованием современных информационно-коммуникационных технологий и формирование личности, адаптированной к жизни в информационном обществе со всеми его возможностями, угрозами, вызовами и рисками, так как минимум половину своего образования он получает путем самообразования.

Несмотря на то, что использование информационно-коммуникационных технологий делает процесс образования эффективным и качественным, процесс информатизации системы образования имеет ряд проблем. К ним можно отнести [3]:



- отсутствие системности и комплексности в решении задач информатизации образования;

- для функционирования постоянно развивающихся информационно-коммуникационных технологий инфраструктуры требуются квалифицированные специалисты, дефицит которых резко ощущается во всех отраслях;

- постоянно возрастающий документооборот в системе образования остается бумажным, не смотря на увеличение количества информации, необходимой для успешной профессиональной деятельности.

Современные требования к уровню знаний будущего специалиста предполагают усиление ориентаций на формирование специальных умений в области креативного подхода выполняемой самостоятельной работы. Поэтому методология учебного процесса должна учитывать нормативную направленность. Ее важной задачей становится методологическое обеспечение процесса познаний студента как будущего специалиста [4].

Методологию на современном уровне необходимо понимать, как систему принципов и способов построения теоретической и практической деятельности, а также как учение об этой системе [5].

Учитывая выше сказанное в современном преподавании графических дисциплин может быть использована *интерактивная модель графического самообразования*, а именно комплексный подход, направленный на развитие личности, путем самоподготовки и самоконтроля, с непосредственным получением и закреплением знаний, навыков и формированием профессиональных компетенций, при помощи использования методических пособий, созданных современными информационно – коммуникационными технологиями. Основными признаками такой модели, учитывая концепцию информатизации системы образования Республики Беларусь на период до 2020 года, будут являться *целостность, информационная полнота, мобильность, ориентированность на индивидуальные качества студента*.

Для того чтобы, в процессе преподавания графических дисциплин и графического самообразования студентов, компьютер стал эффективным инструментарием, его основу должны составлять электронные учебники и пособия. А их применение, в свою очередь должно быть целесообразным и методически обоснованным. Так же для успешного внедрения и применения нового методического инструментария, разработанного с использованием информационных технологий (презентаций, мультимедийных лекций, электронного учебно–методического комплекса и т.д.) преподаватель-разработчик должен учитывать множество факторов: подбор и структурирование учебной информации, простота и привлекательность учебного материала, разработка эскизов графических иллюстраций и алгоритмов решения задач, подготовка материалов для самостоятельной работы и углубленного изучения [7].

*Целостность* процесса преподавания при формировании данной модели заключается в определенной последовательности выделенных ее задач: цель – содержание – средство – результат.

*Информационная полнота и индивидуализации учебного процесса* обеспечивается при учете совокупности определённых принципов, как общедидактических так и оригинальных. Известен целый ряд общедидактических принципов, которыми конкретизируются подходы к разработке содержания, но не могут быть использованы для всех предметов, так как разное содержание наук соответствует разным учебным дисциплинам, разные образовательные цели стоят перед разными дисциплинами, разные мыслительные операции учащихся требуются для усвоения содержания дисциплин, разное «стратегическое» место занимают дисциплины в общем содержании образования [6]. Целевое назначение прин-

ципов проектирования содержания новой модели образования как системы – упорядочить и систематизировать процесс разработки ее содержания.

*Мобильность* интерактивной модели графического самообразования даст возможность для быстрого реагирования на изменения в образовательном пространстве, но в то же время несет в себе фундаментальные знания необходимые для овладения предметом. Доступность интерактивной модели подразумевает свободный доступ, распространение среди студентов данного образовательного ресурса, и легкость его применения.

Для реализации мобильности в обучении необходимы [3]:

- гибкие образовательные программы, выстраиваемые в соответствии со спецификой выполняемой задачи, склонностями и способностями конкретного обучающегося;
- в отдельных случаях нормативное закрепление полной или частичной замены печатных образовательных документов электронными аналогами (электронный журнал класса; электронное домашнее задание и др.).

Только совокупность применения всех принципов в организации учебного процесса и разработке соответствующих образовательных ресурсов, обеспечит функциональное и рациональное применение интерактивной модели графического самообразования студентов, позволит сделать процесс обучения *лично-ориентированным*, а также сделает обучение универсальным для всех форм вузовского образования, так как полностью будет обеспечиваться путем самообразования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалько, В.П. Педагогика и прогрессивные технологии обучения / В.П. Беспалько. – М. : Высш. шк., 1995. – 243 с.
2. Галай, В.А. Начертательная геометрия. Методология и методика: учеб.-метод. комплекс / В.А. Галай. – Новополоцк : ПГУ, 2014. – 260 с.
3. Концепция информатизации системы образования Республики Беларусь на период до 2020 года.
4. Краевский, В.В. Источники методологического обеспечения научно-педагогического исследования / В.В. Краевский // Almamater. Вестник высш. шк. – 2007. - № 3. – С. 35–39.
5. Майсеня, Л.И. Теоретико-методические основы развития математического образования учащихся: уровень среднего специального образования : дис. ... д-ра пед. наук : 13.00.02 / Л.И. Майсеня. – Минск, 2013.
6. Папковская, П.Я. Методология научных исследований : курс лекций / П.Я. Папковская. – Минск : Информпресс, 2006. – 182 с.
7. Vorobjova, A. The effective methods of teaching graphic disciplines / A. Vorobjova // The youth of the 21st century: education, science, innovations: proceedings of III International Conference for students, postgraduates and young scientists, Vitebsk, December 6, 2016 / Vitebsk State P.M. Masherov University. – Vitebsk, 2016. – P. 214–216.

## ОБ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКЕ ДИЗАЙНЕРОВ ИНТЕРЬЕРОВ

Д.Д. Жуков

Институт современных знаний им. А.М. Широкова, Минск, Беларусь

e-mail: zhukov.dd@gmail.com

*Рассматриваются проблемы инженерной подготовки дизайнеров интерьеров в Беларуси и предлагаются организационные, нормативные и методические меры по ее улучшению. Важным шагом может стать объединение отдельных инженерных дисциплин в одну комплексную инженерную дисциплину. Ее главное предназначение должно заключаться в постоянном инженерном обслуживании учебного дизайн-проектирования. Автором статьи уже накоплен определенный опыт обучения дизайнеров интерьеров инженерному делу по-новому.*

*Ключевые слова: инженерная подготовка, дизайнер интерьеров, конструирование, материаловедение, технологии, дизайн-проектирование, инженерное дело.*

## ABOUT ENGINEERING TRAINING OF INTERIOR DESIGNERS

D. Zhukau

Shirokov Institute of Modern Knowledge, Minsk, Belarus

e-mail: zhukov.dd@gmail.com

*The article deals with the problem of engineering training of interior designers in Belarus. Organizational, normative and methodical measures for its improvement are proposed. An important step can be to combine individual engineering disciplines in one integrated engineering discipline. Its main goal should be to improve the process of educational design at the expense of engineering knowledge. The author of the article already has certain experience of new engineering training of interior designers.*

*Keywords: engineering training, interior designer, designing, materials science, technology, design, engineering.*

Данная статья развивает тему инженерной подготовки дизайнеров интерьеров, начатую в статье [1], которая посвящена проблемам преподавания учебных инженерных дисциплин студентам специализации «Дизайн интерьеров». При этом в данном случае упор делается на рассмотрение вопросов, связанных с приобретенным автором новым опытом обучения студентов направления специальности «Дизайн (предметно-пространственной среды)» в Институте современных знаний и Полоцком государственном университете.

Несомненно, специалисты с высшим образованием должны совершенствоваться или, точнее, самосовершенствоваться на протяжении всей своей профессиональной деятельности. Однако умение делать это эффективно закладывается именно в процессе обучения в вузе. Будь иначе, не было бы необходимости в высшем образовании. Значит, ответственность вузов за качественную подготовку самосовершенствующихся специалистов, в т. ч. и дизайнеров интерьеров, трудно переоценить.

Согласно образовательному стандарту [2], специальность «Дизайн» включает в себя, в частности, направление специальности «Дизайн (предметно-пространственной среды)», а оно, в свою очередь, – специализации «Экспозиционный дизайн» и «Дизайн интерье-

ров». Первая специализация в сравнении с первой по своим объектам ближе к «Дизайну (объемному)» [2]. Значит, не будет большой ошибкой для упрощения терминологии отождествить направление специальности «Дизайн (предметно-пространственной среды)» со специализацией «Дизайн интерьеров». Тем более что в Беларуси дизайнеры интерьеров востребованы гораздо больше представителей эксподизайна и в случае необходимости вполне способны их заменить.

Продолжая рассуждения дальше, можно предположить, что существующее деление специальностей, по крайней мере относящихся в заметной мере к дизайну, архитектуре и строительству одновременно, не вполне разумно. Представляется, что соответствующие специальности логично объединять в подгруппы и группы по признаку прежде всего сущностной родственности, которая проявляется в характере конечного продукта профессиональной деятельности, а не общности, порой кажущейся, ее методов и средств. При таком подходе специальность, а не специализация «Дизайн интерьеров» становится родственной специальностям «Архитектура», «Архитектурный дизайн», «Дизайн архитектурной среды» и в определенной мере строительным специальностям, из которых на первое место следует поставить специальность «Промышленное и гражданское строительство». В пользу этого свидетельствуют и отдельные положения образовательного стандарта [2]. В нем записано, в частности, что в результате изучения дисциплины «Материаловедение и технологии» будущий дизайнер предметно-пространственной среды должен знать технологию ведения строительных работ.

В настоящее время в Беларуси специализация «Дизайн интерьеров» является производной от едва ли не всеохватной специальности «Дизайн», теория и методология которого в силу во многом объективных причин еще не успела получить надлежащего развития. Этим отчасти объясняется и то, что специализация «Дизайн интерьеров» считается родственной таким, например, специализациям, как «Дизайн средств производства и транспорта», «Фотография», а также «Телереклама», и то, что в обучении будущих дизайнеров интерьеров и оценке их компетентности зачастую участвуют специалисты, которые далеки от дизайна интерьеров, архитектуры, архитектурного дизайна и дизайна архитектурной среды, а также имеют представление о материальной и конструктивной компоненте строительных объектов на бытовом уровне.

Означенное положение вещей влечет за собой нарушение баланса между художественным (эстетическим) и функциональным (утилитарным) слагаемыми средового строительного объекта в пользу первого слагаемого. Кроме того, оно способствует углублению профессиональной разобщенности. Особенно сильно она проявляется в случае «островных» выпускающих кафедр, не имеющих в своем вузе родственных выпускающих кафедр и/или исследовательских подразделений.

Подобная разобщенность, как показывает практика, вынуждает «островные» кафедры обучать студентов, ставя во главу угла не интересы профессии, а ограниченные, применительно к таким кафедрам, кадровые и материально-технические возможности вуза. Так, например, в Белорусской государственной академии искусств и Институте современных знаний обучение студентов специализации «Дизайн интерьеров» ведется без эффективного взаимодействия с представителями архитектурных и строительных специальностей. В связи с этим, помимо прочего, будущие дизайнеры интерьеров лишаются крайне необходимых им для становления как профессионалов междисциплинарных связей. Сведение к минимуму издержек подобного рода может происходить в результате эффективного

межвузовского сотрудничества, однако оно пока развито слабо. Например, далеко не всегда в работе секций студенческих и преподавательских научных (научно-практических, научно-творческих) конференций участвуют представители разных вузов.

В Институте современных знания инженерная подготовка студентов специализации «Дизайн интерьеров» осуществляется главным образом в рамках учебных дисциплин «Конструирование» и «Материаловедение и технологии» на протяжении шести семестров – с третьего по восьмой. С сентября 2017 г. обе дисциплины преподаются по новым учебным программам. Составители программы по конструированию – Д. Д. Жуков и О. В. Кривёнок, составитель программы по материаловедению и технологиям – Д. Д. Жуков. Эти программы – первый организационно-методический, или регламентный, этап предлагаемой автором статьи оптимизации инженерной подготовки будущих дизайнеров интерьеров и, как следствие, сбалансированного включения этой подготовки в их профессиональный инструментарий.

Следует пояснить, что в данной статье рассматривается инженерная подготовка без включения в нее дисциплин «Технико-экономические расчеты», которая является инженерно-экономической, пропедевтических дисциплин «Черчение» или «Черчение и начертательная геометрия», а также иных дисциплин, имеющих ту или иную инженерную направленность, но не являющихся обязательными с точки зрения учебного дизайн-проектирования.

В Белорусской государственной академии искусств и Полоцком государственном университете инженерный учебный блок содержит такие дисциплины, как «Основы конструирования», «Конструирование», «Материаловедение и технологии» и «Конструкции зданий и сооружений».

Опыт работы автора статьи в трех названных вузах, а также на протяжении почти 30 лет на архитектурном факультете Белорусского национального технического университета подсказал следующее. Для минимизации дублирования учебного материала в рамках упомянутых отдельных дисциплин и значительного повышения эффективности обучения студентов инженерной составляющей дизайна целесообразно на первых порах объединить дисциплины «Основы конструирования» и «Конструирование» в одну под названием «Конструирование» и дисциплины «Материаловедение и технологии» и «Конструкции зданий и сооружений» в одну под названием «Материалы и технологии». Следующий шаг (он относится и к Институту современных знаний) – создание совокупной, комплексной инженерной дисциплины, сопоставимой по своему значению с важнейшей для подготовки дизайнеров интерьеров дисциплиной «Дизайн-проектирование». Название новой комплексной инженерной дисциплины (сокращенно КИД) может быть либо «Материалы, оборудование и технологии», либо, как в случае вышеупомянутой двойной дисциплины, «Материалы и технологии».

Важно уточнить, что под терминами «проектирование» (а) и «конструирование» (б) по традиции, которая сложилась за время подготовки в Беларуси дизайнеров интерьеров, понимают главным образом следующее: а – дизайн-проектирование с преобладанием художественной составляющей архитектурных и дизайнерских решений; б – инженерно-конструкторскую (с минимальным количеством простых расчетов) детализацию архитектурных и дизайнерских решений. Такое понимание в принципе правильно отражает содержание профессиональной деятельности дизайнера интерьеров.

Но вместе с тем явно недостаточное внимание уделяется обучению будущих дизайнеров интерьеров выполнять некоторые инженерные расчеты, необходимые для рационального выбора той или иной формы объекта разработки (дизайн-объекта или его части). Без надлежащего же умения «поверять алгеброй гармонию» эффективность любого дизайнера, имеющего дело с материальными объектами, не самая высокая. Разумеется, дизайнерские инженерные расчеты должны быть несложными, упрощенными. Их смысл в определении дизайнером тех основных геометрических и технических параметров, без которых нельзя доказать правильность формы и материального решения объекта разработки само-

му себе и инженерам. А ведь последние готовят предложения дизайнеров к реализации. Очевидно, если эти предложения основаны лишь на аналогах, тем более ошибочно отобранных в случае, например, оригинального объекта разработки, коммуникация между дизайнером и инженерами, не влекущая за собой экономических и иных издержек, невозможна.

На данный момент система упрощенных инженерных расчетов для сферы дизайна интерьеров не разработана. У автора статьи есть определенные наработки в этом направлении, использование которых дает, как правило, положительные результаты. В особенности ценны для дизайнера интерьеров расчетные методики, позволяющие, например, быстро задать толщину эффективной теплоизоляции в мансардной крыше или размеры поперечного сечения деревянной стойки в коттедже, на которую опирается деревянная главная балка междуэтажного перекрытия. Что касается будущих архитекторов, для них до сих пор актуальным источником знаний в области расчета строительных конструкций остается учебник [3].

В его предисловии говорится: «Основное отличие настоящего учебника от ранее использовавшихся состоит не столько в упрощении расчетов и исключении расчета несущих для архитектора деталей, сколько в направленном на развитие конструктивного мышления студента анализе работы конструкции в целом, а также в расширении сведений об арсенале инженерных конструкций...» [3, с. 5]. Во многом это суждение относится и к дизайнерам интерьеров, которым необходимы главным образом сведения по формообразованию интерьеров и методики соответствующих упрощенных расчетов в части как строительных конструкций, так и мебели, и оборудования, строительной теплотехники, архитектурной акустики и светотехники.

Соответствующий же процесс обучения лучше всего реализовывать в рамках одной дисциплины – упомянутой выше КИД. При этом ее основное предназначение видится в постоянном инженерном обслуживании дисциплины «Дизайн-проектирование». Уместно подчеркнуть, что автор статьи пришел к этому выводу, базируясь в первую очередь на своем немалом опыте преподавания будущим дизайнерам интерьеров дисциплин «Основы конструирования», «Конструирование», «Конструкции зданий и сооружений» и «Материаловедение и технологии», а также руководства дипломным и курсовым дизайн-проектированием.

Название КИД без использования термина «конструирование» – допустим, в виде «Материалы и технологии» – имеет и текущее нормативное обоснование. Согласно образовательному стандарту [2], дисциплина «Материаловедение и технологии» является государственным компонентом цикла специальных дисциплин для направления специальности «Дизайн (предметно-пространственной среды)», дисциплина «Конструирование» – для направления специальности «Дизайн (объемный)». Возможное место дисциплины «Конструирование» в случае первого направления в соответствии с тем же источником занимает дисциплина «Архитектоника объемных форм».

В этом усматривается следующая логика. Во-первых, для направления специальности «Дизайн (объемный)» дисциплина «Конструирование» идет вместе с дисциплиной «Материаловедение», что отражает главный принцип разработки объектов промышленного дизайна. Во-вторых, для направления специальности «Дизайн (предметно-пространственной среды)», которое основывается на теоретических положениях архитектуры, требуется достаточно много времени на серьезное изучение пространственной организации функционального содержания пространства и его предметного наполнения [4, с. 18]. Следовательно, включение в перечень госкомпонентов цикла спецдисциплин направления специальности «Дизайн (предметно-пространственной среды)» дисциплины «Архитектоника объемных форм», а не дисциплины «Конструирование» [2] вполне оправ-

данно. При этом понятие «технологии» применительно к дисциплине «Материаловедение и технологии» следует трактовать расширительно, подразумевая, что указанное понятие поглощает понятие «конструирование».

Оптимизация инженерной подготовки будущих дизайнеров интерьеров видится также, помимо прочего, в следующем:

- в создании электронных (удобных в отличие от морально устаревших бумажных), оперативно изменяемых лекций и практикумов по КИД;
- обязательном распространении КИД и на предшествующий дипломному проектированию семестр;
- приведении фактической учебной загрузки студентов в соответствие с указанным в учебных планах и программах распределением часов (необходимыми в данном случае представляются фотографии рабочего времени студентов).

КИД, как указано выше, может иметь название «Материалы, оборудование и технологии» или «Материалы и технологии». Однако возможен и такой вариант – «Инженерное дело». Он позволяет разбить КИД на части, разделы и подразделы, имеющие сравнительно простые и логичные названия. Первая часть – «Основы инженерного дела», напрямую не связанная с дизайн-проектированием и включающая в себя разделы по химии, физике, электротехнике, архитектурным конструкциям, механике материалов и конструкций, а также архитектурной физике (физике среды). Вторая часть – «Материалы, конструкции и технологии», напрямую связанная с дизайн-проектированием и включающая в себя информацию примерно того же характера, что и нынешние дисциплины «Материаловедение и технологии», «Конструирование» и «Конструкции зданий и сооружений».

Имеющее место в настоящее время раздельное изучение инженерных дисциплин не дает возможности почти все курсовые дизайн-проекты выполнять с приемлемым уровнем инженерных решений. Данное обстоятельство способствует привыканию будущих дизайнеров интерьеров к допустимости непрофессионального отношения к инженерной стороне дизайна, которую не зазорно отдать на откуп «технарям». А нарушение необходимого баланса между эстетическим и утилитарным в дизайне негативно сказывается на результатах труда дизайнеров, принижающих таким образом значение своей профессии.

Конечно, смешанное (комплексное) обучение дизайнеров интерьеров инженерному делу с привязкой его к дизайн-проектированию в организационном, учебно-методическом и научно-методическом отношении несравненно сложнее традиционного раздельного обучения. Так, например, весьма непросто синхронизировать (координировать) все, что связано с организацией учебного процесса по дизайн-проектированию и КИД. Но реализация нового подхода в принципе возможна. Это в определенной мере подтверждают предварительные результаты эксперимента автора статьи в Институте современных знаний (начало ему было положено еще в Белорусской государственной академии искусств). Его суть в том, что на тех занятиях по дисциплинам «Дизайн-проектирование» и «Материаловедение и технологии», которые ведет он один на 4 и 5 курсах специализации «Дизайн интерьеров», моделируется скоординированный подход к решению задач обеих дисциплин. При этом дисциплина «Материаловедение и технологии» рассматривается как КИД.

В рамках аудиторных занятий по дисциплине «Материаловедение и технологии» и соответствующей самостоятельной работы студенты выполняют сквозную комплексную практическую работу. Она посвящена поиску взаимосвязанных ответов на вопросы «Из чего сделать?» (это относится к материаловедению и технологии материалов), «Что сделать?» (это относится к конструированию) и «Как сделать?» (это относится к технологиям). При этом разрабатываются варианты фрагментов проектируемого в ходе дизайн-проектирования объекта. В свою очередь в рамках аудиторных занятий по дисциплине

«Дизайн-проектирование» и соответствующей самостоятельной работы студенты осмысленно разрабатывают необходимые инженерные решения, которые основаны на том, что изучено и сделано в практическом смысле по дисциплине «Материаловедение и технологии».

В настоящее время в Институте современных знаний по предложению автора статьи зафиксирована нижеследующая общая характеристика дисциплины «Конструирование» в соответствующем учебно-методическом комплексе (дается в сокращении).

Дисциплины «Конструирование», «Материаловедение и технологии» и «Дизайн-проектирование» изучаются параллельно в течение третьего – восьмого семестра. При этом в дизайн-проектах реализуются конструктивные решения, разработанные в ходе выполнения практических работ по дисциплине «Конструирование», а выполнение практических работ по дисциплине «Материаловедение и технологии» начинается с разработки их конструктивной подосновы.

В рамках дизайн-проектирования используются, как правило, индивидуально адаптированные к каждому конкретному дизайн-проекту конструктивные решения преимущественно принципиального, универсального характера, разработанные студентами на практических занятиях и в ходе самостоятельной работы по дисциплине «Конструирование».

Для окончательного закрепления знаний и отработки навыков по дисциплине «Конструирование» предназначена курсовая работа, соотносящаяся с дизайн-проектом примерно так же, как и практические работы, но на более высоком уровне сложности.

Теоретико-практический курс дисциплины «Конструирование» разбит на четыре раздела: «Конструкции зданий и сооружений», «Инженерное и специальное оборудование зданий», «Инженерное благоустройство территорий» и «Конструкции мебели».

При изучении указанных разделов к студентам должно прийти понимание того, что проектные решения в области дизайна предметно-пространственной среды воплощаются исключительно в материально-вещественной форме – в виде конкретных изделий и конструкций. От тех и других в значительной мере зависит как образность дизайн-объекта, так и его технико-экономические характеристики: надежность, единовременная стоимость, расходы на эксплуатацию, срок службы и т. д. Облегчают указанное понимание ориентировочные (укрупненные) расчеты определенных, достаточно простых по форме конструктивных элементов и конструкций.

Освоение студентами дисциплины «Конструирование» должно идти на фоне их постоянного стремления к изучению и внедрению конструктивных инноваций, а также к выявлению взаимосвязи между конструктивными решениями, нагрузками и воздействиями на дизайн-объекты и их конструкции, а также условиями эксплуатации, причем без принижения главенствующей роли художественно-образного начала.

Цель дисциплины «Конструирование» и соответствующего учебно-методического комплекса – сформировать у студентов способность к инженерно-конструкторскому обеспечению своей многогранной профессиональной деятельности в качестве дизайнера предметно-пространственной среды.

Задачи дисциплины «Конструирование» и соответственно соответствующего учебно-методического комплекса заключаются в обучении студентов:

- 1) обусловленному в художественно-образном смысле проектированию конструктивной составляющей средовых дизайн-объектов и их компонентов или, иными словами, конструктивному формированию, или конструированию, среды;
- 2) должному пониманию конструктивной сущности дизайн-объектов и их компонентов при анализе и оценке того и другого.

(Конец общей характеристики дисциплины «Конструирование».)



Что касается дисциплины «Материаловедение и технологии», автор статьи предлагает ее нижеследующую общую характеристику для разрабатываемого им учебного пособия по второй части данной дисциплины – «Технологии» (дается в сокращении).

Дизайнер предметно-пространственной среды должен «чувствовать» едва ли не все материалы, из которых формируется среда. А таких материалов великое множество. Если среда интерьерная, для ее создания требуется меньшее количество материалов, но все равно их число колоссально. При этом хорошо подготовленный дизайнер способен оперативно, отчасти или в значительной степени интуитивно, выбирать подходящие для решения конкретных проектных задач материалы.

Как же обнять необъятное и достичь такого уровня профессиональной подготовки, тем более что новые материалы в современном мире рождаются с удивительной быстротой? Скорее всего, так – осваивать основополагающие принципы материаловедческого анализа, последовательно и твердо запоминать важнейшие свойства и варианты применения разных материалов, обретать умение искать и осваивать новую информацию о пока еще неизученных материалах, в т. ч. новейших и находящихся в стадии разработки.

Делать все перечисленное следует самым эффективным для дизайнера образом – одновременно с проектно-художественной деятельностью в ходе, например, учебного дизайн-проектирования. Стараясь при этом всякий раз приходить к обоснованному выбору технологических и конструктивных решений. Дисциплина «Материаловедение и технологии» условно, в методических целях, разделена на две части. То, что сказано выше касается в основном первой части дисциплины – «Материаловедение». Но почти все из этого, после замены некоторых слов и незначительного перефразирования, в полной мере можно отнести и ко второй части – «Технологии».

Подводя итог статье, необходимо отметить: изменение подходов к преподаванию дизайнерам интерьеров инженерных дисциплин диктуется и требованиями рынка, заинтересованного в получении конкурентоспособных специалистов. А конкурентоспособность дизайнера интерьеров – это и его способность находить золотую середину между двумя основными ипостасями дизайна: художественной и функциональной. И если художественная подготовка дизайнеров интерьеров осуществляется в Беларуси достаточно хорошо, то сказать то же самое об их инженерной подготовке пока нельзя. Значит, работа по ее улучшению крайне актуальна и требует продолжения и поддержки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, Д.Д. Проблемы преподавания инженерных дисциплин студентам специализации «Дизайн интерьеров» / Д.Д. Жуков // Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных регионов : сб. ст. респ. науч.-практ. семинара, Новополоцк, 8–9 окт. 2015 г. / Полоцкий гос. ун-т ; под общ. ред. В. Е. Овсейчика (отв. ред.), Г. И. Захаркиной, Р. М. Платоновой. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – С. 201–210.
2. Образовательный стандарт Республики Беларусь. Высшее образование. Первая ступень. Специальность 1-19 01 01 Дизайн (по направлениям) : ОСРБ 1-19 01 01 01-2013. – Введ. 27.12.2013. – Минск : М-во образования Респ. Беларусь, 2013. – 61 с.
3. Инженерные конструкции : учеб. для вузов по специальности «Архитектура» / В. Н. Голосов [и др.] ; под. ред. В.В. Ермолова. – М. : Высш. шк., 1991. – 408 с.
4. Шимко, В.Т. Архитектурно-дизайнерское проектирование. Основы теории (средовой подход) : учебник / В.Т. Шимко. – 2-е изд., доп. и исправл. – М. : Архитектура-С, 2009. – 408 с.

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД К МЕТОДИЧЕСКОМУ  
ОБЕСПЕЧЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ  
ПРИ ИЗУЧЕНИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

Л.С. Турищев

Полоцкий государственный университет, Беларусь

e-mail: lst41@mail.ru

*В статье обсуждаются вопросы разработки методических пособий для студентов по организации их внеаудиторной самостоятельной работы. Такие пособия содержат рекомендации по технологии формирования междисциплинарной системы знаний и умений, а также инструментарий для самооценки успешности формирования такой системы.*

*Ключевые слова: самостоятельная работа, методическое обеспечение, модуль, структурно-логическая схема, квантование текстов, тестовые задания.*

INTERDISCIPLINARY APPROACH TO METHODOLOGICAL  
SUPPORT THE INDEPENDENT WORK OF STUDENTS  
IN THE STUDY OF CONSTRUCTION MECHANICS

L. Turischev

Polotsk State University, Belarus

e-mail: lst41@mail.ru

*The article discusses the development of teaching aids for students in their extracurricular organization of independent work. They include recommendations on technologies of formation of an interdisciplinary system of knowledge and skills, as well as tools for self-evaluation of success of the formation of such a system.*

*Keywords: independent work, methodological support, module, structurally logical, texts quantization, test items.*

Важной особенностью образования XXI века является то, что оно должно не столько вооружать студента готовыми знаниями, сколько сформировать у него способность самостоятельно приобретать их в течение всей своей активной жизни. С этой целью на кафедре строительных конструкций Полоцкого государственного университета в преподавании строительной механики используются современные приемы реализации образовательного процесса:

- формирование интегрированных знаний, умений и навыков;
- обучение методологии деятельности;
- придание самостоятельной работе студента роли одной из главных форм обучения.

Особое внимание уделяется самостоятельной работе студентов. Самостоятельная работа студента трактуется как активное и целенаправленное преобразование получаемой студентом информации согласно учебной программе дисциплин в знания, умения и навыки на любом этапе образовательного процесса [1].

Большое значение придается методическому обеспечению внеаудиторной самостоятельной работы студентов. С этой целью по дисциплине «Строительная механика»,

изучаемой студентами специальности «Промышленное и гражданское строительство», в серии «Самостоятельная работа студентов» проводится разработка и издание электронных пособий для оказания студентам методической помощи при изучении модулей дисциплины. В рамках этой серии планируется издание ко всем модулям дисциплины. В настоящее время издано пять таких электронных пособий к следующим модулям – «Введение в строительную механику», «Методы определения внутренних усилий в статически определимых стержневых конструкциях от неподвижной нагрузки», «Методы определения внутренних усилий в статически определимых стержневых конструкциях от подвижной нагрузки», «Расчет плоских статически определимых ферм», «Расчет трехшарнирных арок».

В электронных пособиях на основе структурно-логических схем приводятся методические рекомендации по технологии формирования междисциплинарной системы знаний, связанных с базовыми теоретическими положениями, принципами и понятиями строительной механики и соответствующих дисциплин естественнонаучного и общепрофессионального циклов. Кроме того, в них содержатся методические указания по приобретению устойчивых умений и навыков, связанных с практическим применением сформированной системы знаний для решения профессионально ориентированных задач курса. И, наконец, в таких пособиях имеется банк тестовых заданий для самоконтроля ключевых знаний и умений, связанных с соответствующим модулем изучаемого курса. Таким образом, пособия позволят студентам эффективно организовать свою самостоятельную работу на основе трех базовых принципов обучения, сформулированных основоположником дидактики Яном Коменским – понимание, усвоение, применение.

Центральную роль в электронных пособиях играют структурно-логические схемы. Такие схемы являются для студентов, образно говоря, своеобразными дорожными картами при изучении строительной механики. Они могут быть трех уровней.

Первый уровень структурно-логических схем позволяет студенту увидеть и понять взаимосвязь изучаемой дисциплины с общеобразовательными и специальными дисциплинами учебного плана специальности, на которой студент учится. Пример схемы этого уровня для строительной механики, изучаемой студентами специальности «Промышленное и гражданское строительство» приведен на рисунке 1.



Рисунок 1. – Структурно-логическая схема взаимосвязи строительной механики с дисциплинами учебного плана специальности «Промышленное и гражданское строительство»

Второй уровень структурно-логических схем позволяет студенту увидеть и понять взаимосвязь разделов изучаемой дисциплины между собой и с соответствующими разделами (темами) обеспечивающих общеобразовательных дисциплин учебного плана. При-

мер схемы этого уровня для строительной механики, изучаемой студентами специальности «Промышленное и гражданское строительство» приведен на рисунке 2.

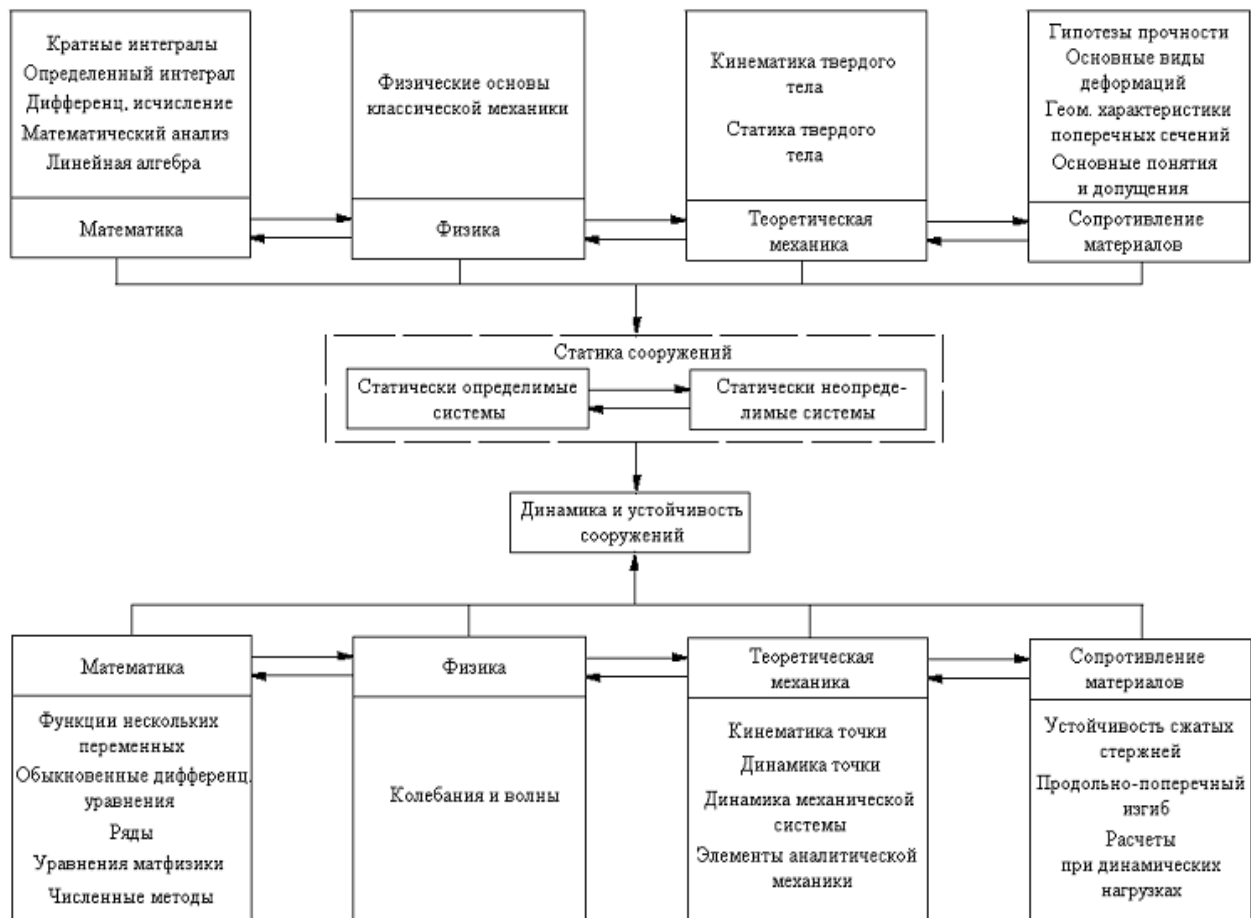


Рисунок 2. – Структурно-логическая схема взаимосвязи разделов строительной механики с разделами обеспечивающих дисциплин

И, наконец, третий уровень структурно-логических схем позволяет студенту увидеть и понять взаимосвязь ключевых положений, принципов, понятий определенного модуля изучаемой дисциплины. Пример схемы этого уровня для модуля «Введение в строительную механику» дисциплины «Строительная механика», изучаемой студентами специальности «Промышленное и гражданское строительство» приведен на рисунке 3.

Структурно-логические схемы первых двух уровней дополняются общими методическими указаниями по изучению курса и его разделов в целом. Структурно-логические схемы третьего уровня сопровождаются развернутыми методическими указаниями, помогающими самостоятельному пониманию и усвоению ключевых положений, принципов, понятий изучаемого модуля строительной механики.

Важной составляющей, способствующей глубокому пониманию и усвоению ключевых положений, принципов, понятий изучаемых модулей дисциплины, является включение в электронные пособия приложений, содержащие системную учебную информацию из общеобразовательных дисциплин, связанную с содержанием соответствующего модуля строительной механики. Такая информация излагается в соответствии с принципами теории квантования учебных текстов [2], позволяющими представить её разделенной на сравнительно короткие части, удовлетворяющие требованиям ясности, точности, последовательности и доказательности и, следовательно, сделать её понятной для дальнейшего использования.

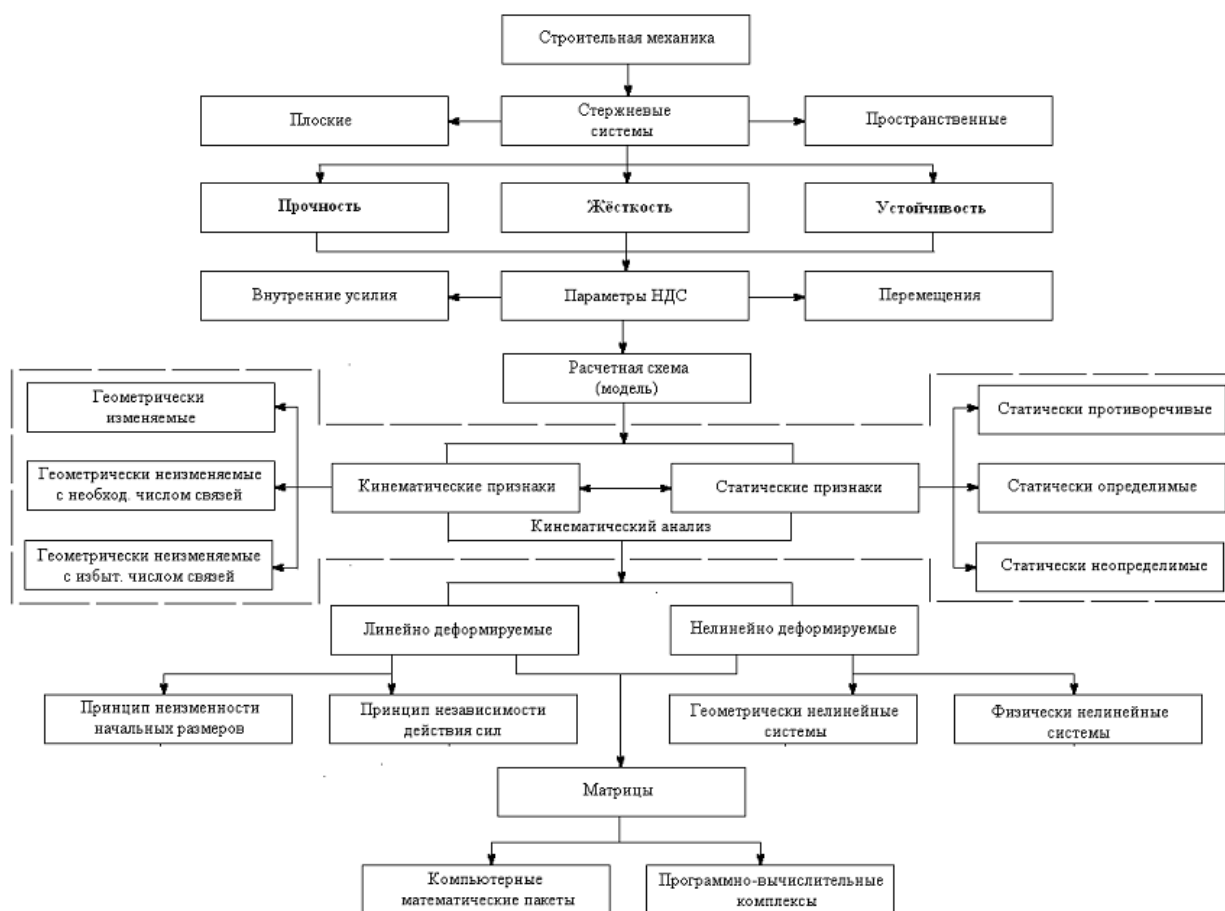


Рисунок 3. – Структурно-логическая схема взаимосвязи ключевых понятий, принципов, терминов модуля «Введение в строительную механику»

Известны два вида трудностей, которые испытывают студенты в случае использования учебной информации предыдущих дисциплин учебного плана при изучении его новых дисциплин [2]. Во-первых, студент может иметь представление о такой информации, но не осознавать полностью смысл всего её содержания. И, во-вторых, студенты могут осознавать смысл содержания предыдущей учебной информации, но при этом не уметь в ней самостоятельно выделить, то главное, что связано с новой изучаемой дисциплиной.

Поэтому включение в электронные пособия по организации самостоятельной работы студентов предыдущей учебной информации в соответствии принципами теории квантования учебных текстов позволяют студенту понять и усвоить базовыми теоретическими положениями и понятиями изучаемого модуля строительной механики на междисциплинарной основе.

Понимание и усвоение теоретического материала курса на междисциплинарной основе является залогом успешного овладения методикой и приобретения умений решения профессионально ориентированных задач согласно образовательному стандарту для специальности «Промышленное и гражданское строительство» и учебной программе дисциплины «Строительная механика». С этой целью в каждое пособие включаются методические указания к решению задач, связанных с содержанием изучаемого модуля, а также приводятся детально разобранные примеры их решения.

Важную роль при организации самостоятельной работы студентов играет адекватная оценка самими студентами приобретенных ими знаний и умений. Наиболее рационально, по-видимому, это можно осуществлять с помощью самотестирования. Для его проведения в пособиях содержатся тестовые задания трех уровней [3]:

- тестовые задания первого уровня позволяют проверить понимание и усвоение основных понятий, принципов, терминов изученного модуля;
- тестовые задания второго уровня позволяют проверить умение решать типовые профессионально ориентированные задачи изученного модуля;
- тестовые задания третьего уровня, позволяют проверить умение решать нетиповые профессионально ориентированные задачи изученного модуля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Турищев, Л.С. Организация управляемой самостоятельной работы студентов на кафедре механики Полоцкого государственного университета / Л.С. Турищев // Механика – 2007 : материалы III Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике, Минск, 12-16 окт. 2007. – Минск, 2007. – С. 204–207.
2. Аванесов, В.С. Теория квантования учебных текстов / В.С. Аванесов // Современная высшая школа: инновационный аспект. – 2014. – № 1. – С. 71–81.
3. Беспалько, В.П. Слагаемые педагогической технологии / В.П. Беспалько. – М. : Педагогика, 1989. – С. 192.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ .....	3
-------------------------------	---

### Секция I АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

<b>Борсук Е.В., Милашевич О.Н.</b> Общие сведения об историческом информационном моделировании зданий (HBIM) .....	4
<b>Борсук Е.В., Милашевич О.Н.</b> Реконструкция исторических объектов с использованием BIM-технологий на примере собора в Дареме .....	8
<b>Евстратенко А. В.</b> К вопросу формирования придорожной инфраструктуры в Беларуси .....	13
<b>Железова Н.А.</b> Аспекты исторического и культурного развития н.п. Освея Верхнедвинского района Витебской области .....	17
<b>Филиппенко Я.Д., Бакатович А.А.</b> Анализ типологии застройки жилых территорий города Полоцка .....	27
<b>Платонова Р.М.</b> Архитектура исторических усадеб Полоцкого района .....	33
<b>Голушкова О.В., Политыко А.А.</b> Проектирование среды равных возможностей в получении образовательных услуг на примере БРУ .....	39

### Секция II СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЁТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ

<b>Гарунович В.С., Аль Нахди А.С.</b> Прочность механического муфтового соединения стержневой арматуры .....	44
<b>Генина Е., Рыбаков Ю.</b> Влияние методов производства работ на конструктивное решение многоэтажного здания с подземными этажами .....	47
<b>Волик А.Р.</b> Неразрушающие методы для оценки несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций .....	55
<b>Гиль А.И., Лазовский Е.Д.</b> Методика экспериментальных исследований сопротивления изгибу статически неопределимых железобетонных балок с гибридным армированием .....	61
<b>Кучукбаева К.А.</b> Аварийные случаи применения грунтовых анкеров .....	67
<b>Малюк В.В., Леонович С.Н., Будревич Н.А.</b> Конструкционный бетон морских гидротехнических сооружений: деградационный и внезапный отказ .....	70
<b>Малюк В.В., Леонович С.Н., Будревич Н.А.</b> Расчетный срок службы морских берегозащитных сооружений .....	77
<b>Семенюк С.Д., Морозов И.В.</b> Факторы, влияющие на работу монолитных железобетонных покрытий автодорог .....	82
<b>Поляков А.Н.; Кремнёв А.П.</b> Опыт применения георадарного зондирования при проведении инженерных изысканий .....	86

<b>Семенюк С.Д., Седляр Т.Н.</b> Методика экспериментальных исследований сцепления арматуры серповидного профиля с легкими бетонами .....	92
<b>Снежков Д.Ю., Леонович С.Н.</b> Автоматизированный мониторинг высотного здания с монолитным железобетонным каркасом .....	95
<b>Турищев Л.С.</b> К вопросу о линеаризации задач устойчивости ферм .....	102
<b>Хаткевич А.М.</b> Расчёт сжатых каменных и армокаменных элементов с учетом физической нелинейности .....	110
<b>Ягнюк Б.Н.</b> Расчет каркасов зданий на прогрессирующее обрушение .....	116
<b>Артемёнок В.В., Кремнёв А.П., Вишняков Н.Н.</b> Определение механических характеристик грунта для расчёта оснований и фундаментов по модели упрочняющегося грунта .....	123
<b>Волик А.Р., Новикова Т.С., Свинцицкий А.А.</b> Усиление изгибаемых железобетонных элементов с применением композитных тканей .....	128
<b>Вишняков Н.Н., Кремнев А.П.</b> Влияние анизотропии прочностных свойств грунтов на несущую способность фундаментов распорных сооружений .....	132
<b>Козьянина Т.Г., Колтунов А.И.</b> Использование неразрушающих методов контроля при обследовании конструкций реконструируемых зданий .....	138
<b>Костюрина К.А., Кремнева Е.Г.</b> Применение цементно-песчаных прослоек, модифицированных Стахемент 2000М, в составных железобетонных конструкциях .....	143
<b>Лазовская И.В.</b> Перспективные области применения серобетона в строительной отрасли Республики Беларусь .....	147

### Секция III

#### РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

<b>Шинкарева Е.В., Статкевич П.И., Леонович С.Н., Будревич Н.А.</b> Антикоррозионная термостойкая цинкнанолненная грунт-эмаль на основе этилполисиликата, модифицированного наноглеродными частицами .....	151
<b>Бакатович А.А., Флориндо Гаспар, Наумов М.</b> Теплоизоляционный плитный материал на основе мха сфагновых болот.....	156
<b>Voišniene V., Kizinievic O.</b> Research of fly ash and slag (bottom ash) from municipal waste incineration. The possibilities of secondary use.....	163
<b>Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Коледа Е.А., Будревич Н.А.</b> Технологические свойства самоуплотняющегося бетона: влияние добавки наноструктурированного углерода.....	168
<b>Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Коледа Е.А., Будревич Н.А.</b> Бетон с добавкой наноструктурированного углерода: физико-механические характеристики.....	173
<b>Парфёнова Л.М., Высоцкая М.Н.</b> Прочность цементно-зольного камня в зависимости от условий твердения .....	179
<b>Полейко Н.Л., Леонович С.Н., Пелюшкевич А.И.</b> Флюсовый известняк сталеплавильного производства в качестве крупного заполнителя.....	183
<b>Семёнов Д.А., Клевекко В.И.</b> Технология производства геосинтетических оболочек, применяемых в строительстве .....	189
<b>Fareed M.A. Karim, Khaled Abdulhalim Rubassi, Al Nahdi A.S</b> Assessment of road traffic noise pollution: a case study.....	193
<b>Чернюк В.П., Шляхова Е.И.</b> Устройство для бурения шпуров и скважин в грунт основания .....	203



<b>Шляхова Е.И., Левчук Н.В.</b> Вопросы ресурсо- и энергосбережения при получении бетонов с базальтовой фиброй .....	207
<b>Замировский А.В.</b> Характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном в условиях статического нагружения .....	210
<b>Булай Т.В., Кузьменков Д.М., Шалухо Н.М.</b> Исследование физико-механических свойств серного бетона .....	218
<b>Кравченко В.В.</b> Моделирование собственных деформаций цементных композитных систем в условиях «внутреннего увлажнения» .....	221
<b>Драгель А.А.</b> К вопросу о повышении скорости набора пластической прочности Пенобетоном.....	231
<b>Парфёнова Л.М., Разуева Е.А., Высоцкая М.Н.</b> Оптимизация концентрации щелочного активатора для геополимерного вяжущего.....	236
<b>Шабанов Д.Н., Ягубкин А.Н., Трамбицкий Е.А.</b> Контроль напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций с использованием метода тензометрии.....	242
<b>Романовский С.А., Бакатович А.А.</b> Влияние основных факторов на физико-механические характеристики теплоизоляционного материала из очесов волокна льна .....	248
<b>Сафончик Д.И., Лыщик М.В.</b> Технологические аспекты получения пеностекла .....	256
<b>Катульская А.С., Парфёнова Л.М.</b> Водостойкость модифицированных гипсовых вяжущих .....	260
<b>Долгонож А.В., Давыденко Н.В., Бакатович А.А.</b> Определение теплофизических свойств стеновых материалов на растительных заполнителях в климатической камере.....	263
<b>Зубцов В.И., Шабанов Д.Н., Ягубкин А.Н., Фарран Д.Х.</b> Контроль механических напряжений внутри деформируемых сред пьезопреобразователями .....	271
<b>Ягубкин А.Н.</b> Модифицированный арболит с направленной укладкой заполнителя как стеновой тепловой аккумулятор.....	281
<b>Шабанов Д.Н., Зябкин Е.А.</b> Моделирование и прототипирование концевых зажимов для испытания и получения предварительного напряжения композитной арматуры .....	288
<b>Полейко Н.Л., Леонович С.Н., Пелюшкевич А.И.</b> Бетон на кубовидном щебне для конструкций в условиях центрального и внецентренного сжатия.....	292
<b>Парфёнова Л.М., Хватынец В.А.</b> Дисперсное армирование цементных систем отходами щелочестойкой стеклотетки.....	299

#### Секция IV

#### ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И УПРАВЛЕНИЕ НЕДВИЖИМОСТЬЮ

<b>Голушкова О.В., Гавриленко А.Д.</b> Обеспечение качественных показателей.....	304
производства строительных конструкций с помощью статистических методов	
<b>Шпилевская Н.Л., Шведов А.П.</b> Особенности нормативного обеспечения для проектирования организации и производства работ по устройству рабочих швов бетонирования.....	311
<b>Кисель Е.И., Срывкина Л.Г.</b> Информационная поддержка принятия решений при оперативном планировании строительного производства .....	316

## Секция V

### ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ И ПРИРОДООХРАННЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

<b>Журавская Н.Е.</b> Уровни функциональной упорядоченности систем теплоснабжения в условиях получения и применения омагниченной воды .....	323
<b>Королёва Т.И., Ланкович С.В., Ковалевский П.Е., Яковенко С.А.</b> Исследование способов воздухораспределения текстильными воздуховодами.....	328
<b>Липко В.И., Добросольцева Е.С., Лапезо А.С.</b> Основы теории аэродинамики и тепловоздухообмена через вентилируемые оконные конструкции энергоэффективных зданий повышенной теплозащиты и герметичности наружных ограждений .....	333
<b>Липко В.И., Широкова О.Н., Лапезо А.С.</b> Архитектурно-планировочные и конструктивно-технологические усовершенствования энергоэффективных зданий в науку и практику градостроительства.....	341
<b>Липко В.И., Широкова О.Н., Лапезо А.С.</b> Энергоресурсосберегающие инновационные Решения по снижению тепловых воздействий на работающих в горячих цехах промышленных предприятий методами экранно-шторной аэрации.....	347
<b>Липко В.И., Широкова О.Н., Лапезо А.С.</b> Методы расчета и проектирования Энергоэффективных зданий с многоступенчатой технологией использования природных и возобновляемых энергоресурсов .....	353
<b>Липко В.И., Кундро Н.В.</b> Энергоресурсоэффективное устройство инсолятора для подогрева наружного приточного вентиляционного воздуха за счет солнечной радиации .....	361
<b>Липко В.И., Кундро Н.В., Лапезо А.С.</b> Методика аэродинамического расчета регулируемой инфильтрации через навесные вентилируемые фасады и рекуперативные приточные вентблоки РПВЭ конструкции Полоцкого государственного университета .....	365
<b>Липко В.И., Кундро Н.В., Лапезо А.С.</b> Энергоресурсосберегающие технологии тепловоздухоснабжения зданий с регулируемой инфильтрацией через вентилируемые светопрозрачные навесные фасады и рекуперативные приточные вентблоки РПВЭ .....	372
<b>Липко В.И., Лапезо А.С.</b> Энергоресурсоэффективная система тепловой вентиляции газифицированных кухонь с универсальными многофункциональными бытовыми газовыми плитами конструкции Полоцкого государственного университета.....	376
<b>Липко В.И., Ланкович С.В.</b> Научно-методические инновационные разработки снижения металло- и энергоемкости инженерных систем теплоснабжения зданий с неравномерным утеплением наружных стен при воздушном отоплении.....	385
<b>Липко В.И., Ланкович С.В.</b> Конструктивно-технологические усовершенствования энергоэффективных зданий с технологическими чердаками с целью минимизации теплоснабжения от внешних энергоресурсов .....	393
<b>Нияковский А.М.</b> К вопросу модернизация систем вентиляции общеобразовательных школ.....	399

<b>Ющенко В.Д., Лесович Е.В., Велюго Е.С., Зыкова Ю.В.</b> Анализ причин потерь воды жилого фонда г. Новополоцка при ее реализации населению .....	404
<b>Пивоварова С.И., Василевич Д.А., Василевич Н.А.</b> Энергоресурсосберегающие системы отопления и вентиляции культовых зданий с применением нетрадиционных источников энергии.....	409
<b>Королёва Т.И., Зафатаев В.А.</b> Термодинамическое обоснование утилизации теплоты дымовых газов в конденсационных теплоутилизаторах на примере котельной «5-й полк» г. Витебска.....	418

#### Секция VI

#### ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО АРХИТЕКТУРНОГО И СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

<b>Василевский А.В., Грек Н.Г.</b> Реализация инновационных подходов в подготовке инженеров-строителей .....	426
<b>Воробьева А.А., Скрабатун М.А.</b> Проблемы преподавания графических дисциплин на строительных специальностях и возможные пути их решения .....	429
<b>Жуков Д.Д.</b> Об инженерной подготовке дизайнеров интерьеров .....	434
<b>Турищев Л.С.</b> Междисциплинарный подход к методическому обеспечению самостоятельной работы студентов при изучении строительной механики .....	441